МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Б. Ф. Федоров

ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 605

Б. Ф. ФЕДОРОВ

ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1966 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Жеребцов И. П., Канаева А. М., Корольков В. Г., Кренкель Э. Т., Куликовский А. А., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

УДК 621.378.325
Ф33

Излагаются общие сведения о принципах действия оптических квантовых приборов, конструкции оптических квантовых генераторов на твердом теле, газах и полупроводниках, особенностях их изготовления и работы с ними. Приводятся основные параметры оптических квантовых генераторов отечественного и зарубежного изготовления и основные направления их применения.

Предназначена для подготовленных радиолюбителей.

Федоров Борис Федорович

Оптические квантовые генераторы. М.—Л., изд-во „Энергия", 1966, 88 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 605)

$\frac{3\text{-}4\text{-}5}{359\text{-}66}$

Редактор *И. А. Никольский* Техн. редактор *О. П. Печенкина*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 6/I 1966 г. Подписано в печать 19/IV 1966 г.
Т-04092 Бумага типографская № 2 84×108¹/₃₂ Печ. л. 4,62 Уч.-изд. л. 4,47
Тираж 25 000 экз. Цена 18 коп. Зак. 2013

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Десять лет назад были разработаны и исследованы молекулярные квантовые генераторы, что явилось началом практического использования внутренней энергии молекул и атомов для генерации высокочастотных электромагнитных колебаний. Генераторы этого типа по принципу действия существенно отличаются от широко известных электронных генераторов — ламповых, магнетронных, клистронных, в основе работы которых лежит преобразование кинетической энергии свободно движущихся в вакууме электронов в энергию высокочастотных колебаний в результате взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем колебательной системы генератора.

Появление молекулярных квантовых генераторов способствовало решению двух весьма важных задач: созданию источников излучения с высокой стабильностью частоты, намного превышающей стабильность кварцевых генераторов, и появлению устройств, предназначенных для усиления чрезвычайно слабых электромагнитных колебаний.

За фундаментные исследования в области квантовой радиофизики и создание первых образцов квантовых генераторов Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, сотрудники Физического института Академии наук, удостоены Ленинской премии в 1959 г.

В 1960 г. были созданы квантовые генераторы в инфракрасном и видимом диапазонах. Появление оптических квантовых генераторов положило начало бурному развитию нового направления в радиоэлектронике, а именно квантовой электроники — направления, занимающегося разработкой теории и методов создания квантовых приборов, в том числе оптических квантовых

генераторов и усилителей, а также способами их применения в науке и технике.

Если 1960—1961 гг. считают временем рождения лабораторных макетов оптических квантовых генераторов и усилителей, то теперь можно говорить о широком внедрении промышленных образцов квантовых генераторов в локацию, приборостроение, связь, медицину. Успехи советской науки в области развития квантовой электроники общепризнаны. Одним из проявлений этой признательности является присуждение Нобелевской премии по физике за 1964 г. Н. Г. Басову и А. М. Прохорову совместно с американским ученым Ч. Таунсом за исследования в области квантовой электроники.

Ознакомлению с принципами действия, конструктивным выполнением, параметрами и основными направлениями применения оптических квантовых генераторов в науке и технике и посвящена эта брошюра.

O

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЦИПАХ ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

В соответствии с квантовой теорией энергия элементарных излучателей может изменяться только скачками, кратными некоторому значению, постоянному для данной частоты излучения. Минимальная «порция» энергии называется квантом энергии и обозначается:

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная Планка;

ν — частота излучения.

При этом излучение рассматривается как поток частиц энергией $h\nu$, называемых фотонами.

Фотоны, энергия которых определяется однозначно частотой излучения, являются частицами материи, обладающими не только энергией $h\nu$, но и импульсом (количеством движения)

$$P = \frac{E}{c},$$

где c — скорость света в вакууме, причем направление импульса совпадает с направлением излучения. Обмен энергией между элементарными излучателями, которые для сокращения назовем микросистемой, и светом происходит путем порождения (излучения) одних и уничтожения (поглощения) других квантов электромагнитного поля.

Электромагнитные колебания, взаимодействуя с микросистемой, изменяют ее внутреннюю энергию. Микросистема включает в себя молекулы, атомы, ионы и электроны, движение и ориентация которых соответствуют дискретному ряду энергий — энергетическим состоя-

ниям или энергетическим уровням. Внутренняя энергия системы квантована. Частицы могут совершать переход с одного энергетического уровня на другой. При этом происходит изменение от одного значения внутренней энергии, соответствующего определенному движению и

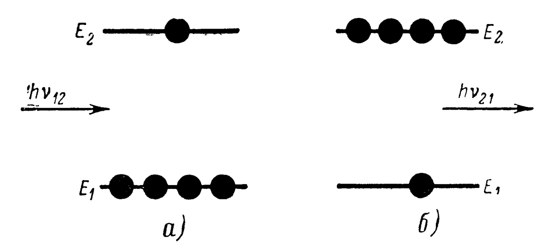


Рис. 1. Схема двухуровневой энергетической системы.

ориентации частиц, к другому значению внутренней энергии, соответствующему другому движению и ориентации. Изменение движения и ориентации может иногда происходить одновременно. Если конечная величина внутренней энергии системы при воздействии на нее электромагнитных колебаний больше начальной ее величины, разность энергии пополняется за счет электромагнитного поля и происходит поглощение. И, наоборот, если энергия отдается электромагнитному полю, происходит излучение и конечное состояние системы должно соответствовать меньшей энергии, чем начальное.

Энергия поля излучения также квантована, так что обмен энергией между полем и системой может происходить только дискретно. Если энергия системы (рис. 1) в верхнем энергетическом состоянии равна E_2, а в нижнем E_1, то частота ν_{21} электромагнитных колебаний, связанных с переходом системы между состояниями *2* и *1* вверх (*1*—*2*) или вниз (*2*—*1*), определяется условием Бора:

$$E_2 - E_1 = h\nu_{21}.$$

Излучение состоит из квантов с определенной частотой и энергией. Длина волны излучения определяется выражением

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E},$$

где

$$\Delta E = E_2 - E_1.$$

Однако не все переходы между энергетическими состояниями являются возможными. Согласно теории, подтвержденной экспериментами, могут происходить только определенные переходы и существуют «правила отбора», которые позволяют определить разрешенные переходы между различными энергетическими уровнями.

Для простоты рассуждений допустим, что квантовая система имеет два энергетических состояния (рис. 1), верхнее и нижнее, между которыми разрешены переходы. Если система находится в верхнем состоянии (рис. 1,*б*), то имеется определенная вероятность, что через некоторый промежуток времени она перейдет в нижнее состояние (рис. 1,*а*) и произойдет излучение энергии. Эта вероятность имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая вероятности перехода из верхнего состояния в нижнее (т. е. перехода, сопровождаемого излучением) аналогична вероятности распада радиоактивного вещества: она зависит от свойств системы и данного перехода и не зависит от внешних факторов. Переменная составляющая линейно зависит от плотности энергии поля на частоте перехода, действующего на систему извне. Наличие поля на частоте перехода повышает вероятность излучения системой, находящейся в верхнем состоянии.

Если поле, действующее на систему извне, отсутствует, то процесс перехода системы в нижнее состояние, сопровождаемый излучением и характеризуемый постоянной составляющей вероятности перехода, называется спонтанным излучением.

Если на квантовую систему действует внешнее поле на частоте перехода, то процесс спонтанного перехода системы в нижнее состояние происходит по-прежнему; при этом фазы испускаемого излучения не зависят от внешнего электромагнитного поля. Однако, как указывалось выше, внешнее поле на частоте перехода повышает вероятность этого перехода, вызывая излучение, находящееся в определенном фазовом соотношении с внешним полем. Этот процесс называется вынужденным или индуцированным излучением.

Таким образом, система, находящаяся в верхнем энергетическом состоянии, может стать источником излучения электромагнитной энергии. Системы, находящиеся в нижнем энергетическом состоянии, поглощают излучение на частоте перехода, причем вероятность этого поглощения равна вероятности индуцированного излучения из верхнего энергетического состояния. Следовательно, при использовании системы для усиления или генерирования излучений необходимо обеспечить перевод ее частиц в верхнее энергетическое состояние и каким-нибудь способом поддерживать избыток частиц в этом состоянии. Для достижения верхнего состояния система совсем не обязательно должна поглотить электромагнитную энергию на частоте перехода. Требуемая энергия может быть введена, например, электронной бомбардировкой, механическим воздействием, нагреванием и другими способами возбуждения.

Таким образом, чтобы использовать связь поля излучения с внутренней энергией частиц микросистемы для усиления или генерирования излучения, необходимо иметь источник энергии, который переводил бы частицы в возбужденное состояние.

Состояние системы, находящейся в тепловом равновесии, характеризуется выражением Больцмана:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = e^{-\frac{hc}{\lambda kT}},$$

где k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

n_1 — плотность заселенности для первого уровня, равная отношению числа активных центров (частиц) к объему среды в кубических сантиметрах;

n_2 — плотность заселенности для второго уровня.

Для энергетических переходов, вызывающих излучения оптического диапазона с длиной волны 3000—8000 Å, и нормальной температуры ($T>0$) это отношение меньше единицы. Таким образом, для системы, находящейся в тепловом равновесии, наиболее заселен-

ным оказывается нижний уровень, в результате чего имеет место поглощение энергии. Если, однако, обеспечить $n_2 > n_1$, т. е. сделать перенаселенным верхний уровень, что формально достигается при $T<0$, то будет иметь место излучение энергии. Состояние такой системы часто называют *состоянием с отрицательной температурой*.

Поскольку предметом рассмотрения в данной брошюре являются приборы оптического диапазона, рассмотрим процесс прохождения света через среду. В общем виде этот процесс описывается выражением

$$I = I_0 e^{-\alpha l},$$

где I_0 — интенсивность светового потока, падающего в среду;

I — интенсивность светового потока после прохождения пути l в среде, характеризуемой коэффициентом α;

α — коэффициент поглощения, равный отношению поглощения на единицу длины;

l — толщина среды.

Коэффициент α зависит от того, сколько частиц микросистемы (среды) находится на верхнем и нижнем энергетических уровнях, т. е. от заселенности уровней:

$$\alpha_{12} = (n_1 - n_2)\sigma_{12},$$

σ_{12} — поперечное сечение поглощения, равное вероятности взаимодействия с системой света с длиной волны $\lambda = hc/\Delta E_{12}$.

Если взятая нами среда находится в состоянии с отрицательной температурой ($n_2 > n_1$), то

$$\alpha = (n_1 - n_2)\sigma_{12} < 0.$$

Таким образом,

$$\alpha = |(n_2 - n_1)|\sigma_{12} > 0$$

и

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha l} = e^{|(n_2 - n_1)|\sigma_{12} l} > 1.$$

Отношение I/I_0 характеризует излучение количественно. Иллюстрация характера поглощения и излучения средой с различной заселенностью энергетических уров-

ней приведена на рис. 2. Выражение I/I_0, количественно характеризующее излучение, позволяет видеть, что усиление системы определяется длиной пути l, проходимого излучением в среде. В случае значительного l бóльшее число частиц участвует в переходе с верхнего

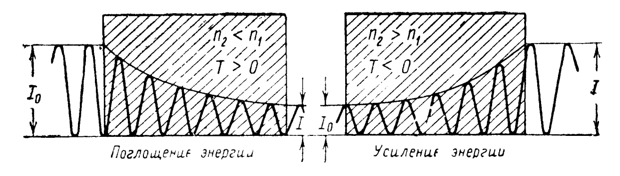


Рис. 2. Ослабление и усиление электромагнитной энергии системами с положительной и отрицательной температурами.

уровня на нижний. Значительного увеличения l можно добиться, помещая среду между двумя плоскопараллельными зеркалами. При этом используется эффект многократного прохождения излучения через среду за счет отражения от зеркальных поверхностей. В этом случае имеет место резонансное усилие электромагнитной энергии. Усиление такой системы определяется выражением

$$Q = \frac{A}{1 - \beta A},$$

где A — усиление без обратной связи;
β — коэффициент обратной связи.

Когда βA равно единице, усиление становится равным бесконечности и система начинает генерировать.

Излучение многократно отражается от зеркальных поверхностей, образующих открытый резонатор, в результате чего в нем устанавливается определенный тип колебаний. Если одна из пластин резонатора полупрозрачна, то через нее излучается плоская волна, имеющая чрезвычайно малую расходимость. Угол расхождения волны θ определяется только дифракцией и равен:

$$\theta = 1{,}22 \frac{\lambda}{d},$$

где d — диаметр излучателя.

Это излучение характеризуется монохроматичностью, когерентностью и узконаправленностью, что обусловлено самой физикой индуцированного (вынужденного) излучения.

Таким образом, для получения индуцированного излучения необходимо обеспечить следующие условия:

иметь среду, которая могла бы принимать состояние с отрицательной температурой;

создать перенаселенность верхнего энергетического уровня по сравнению с нижним, для чего необходимо иметь источник энергии, который переводил бы частицы в возбужденное состояние;

выполнить условие самовозбуждения

$$Re^{|\alpha| l} \simeq 1,$$

где R — коэффициент потерь, что обеспечивается, как уже говорилось, помещением среды в открытый разонатор с высокой добротностью.

БЛОК-СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

Блок-схема оптического квантового усилителя (ОКУ) приведена на рис. 3. Усилитель состоит из следующих основных элементов: среды, называемой чаще активным веществом, открытого резонатора, источника возбуждения и источника питания.

Активное вещество, используемое для получения индуцированного излучения, должно обладать такими уровнями энергии, переход между которыми сопровождается излучением, лежащим в требуемом для усиления диапазоне частот. Это вещество должно иметь определенную концентрацию активных частиц — элементарных излучателей электромагнитной энергии. Чем больше будет таких частиц, тем больше их примет участие в усилении попавшего на активное вещество излучения,

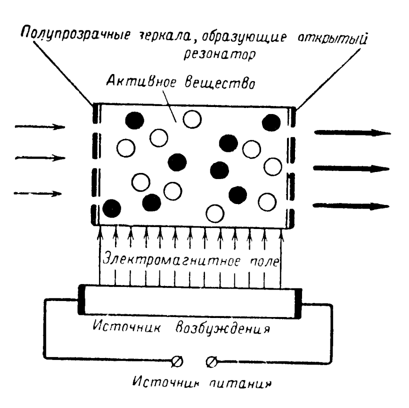


Рис. 3. Блок-схема оптического квантового усилителя.

тем больше выходная мощность излучения. Слишком высокая концентрация примесных частиц нежелательна, так как она вызывает расширение спектральных линий поглощения и излучения.

В ОКУ образец активного вещества помещен в открытый резонатор, образованный системой из двух параллельных зеркальных пластин, в котором электромагнитные колебания претерпевают многократные отражения от зеркальных пластин, что приводит к образованию стоячих волн.

Зеркала удалены друг от друга на несколько сантиметров, а длина волны излучения 0,5—5 *мк*. Точность обработки поверхности зеркал составляет доли длины волны. Поскольку размеры открытого зеркального резонатора значительно больше длины волны, на которой работает ОКУ (в отличие от резонаторов СВЧ), то он имеет большое число видов колебаний. Чтобы уменьшить число видов колебаний, размеры отражательных пластин делают небольшими по сравнению с расстоянием между ними. Это обеспечивает хорошее выделение колебаний только такого вида, направление распространения которых близко совпадает с оптической осью резонатора.

Остальные виды колебаний, падающие под некоторым углом к оси системы, быстро уходят за пределы резонатора, не получив достаточного усиления, так как время их взаимодействия с активными частицами вещества оказывается недостаточным для этого. Такая конструкция резонатора позволяет из нескольких сотен тысяч видов колебаний выделить около десятка видов, которые и создают полезное излучение. Ввод энергии, которую необходимо усилить, производится через одну из пластин, вывод усиленной энергии — через другую. Обе зеркальные пластины делаются полупрозрачными.

Источник возбуждения активного вещества служит для перевода в возбужденное состояние большинства активных частиц с тем, чтобы при попадании на ОКУ электромагнитной волны определенной частоты произошло ее лавинообразное усиление.

Поясним механизм возбуждения и усиления излучения на примере, когда в качестве активного вещества используется синтетический рубин с примесью хрома. При освещении кристалла рубина белым или зеленым

светом ионы хрома возбуждаются и переходят на высший уровень, поглощая энергию зеленой части спектра (рис. 4). Рубин имеет две полосы поглощения в зеленой и синей части спектра ($\lambda_{в.з}$ и $\lambda_{в.с}$).

Для получения усиления необходимо, чтобы в среднем не менее половины ионов, находящихся в основном

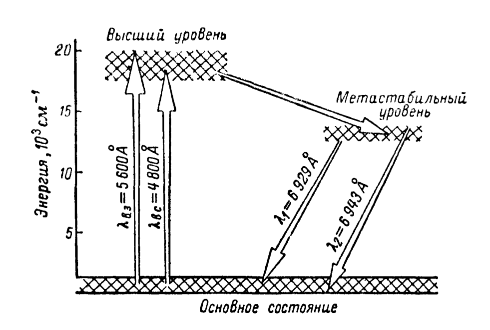


Рис. 4. Схема энергетических уровней ионов хрома в рубине.

состоянии, перешло на верхний энергетический уровень. Этот уровень нестабилен, и частицы быстро совершают безызлучательный переход на промежуточный (метастабильный) уровень, который более стабилен, чем верхний. На промежуточном уровне может находиться значительное число частиц. При воздействии на кристалл слабого излучения соответствующей частоты возникает индуцированное излучение, сосредоточенное в основном на волне 6943 Å и слабое — на волне 6929 Å Все частицы с промежуточного уровня совершают индуцированный переход на основной уровень синфазно, что и создает когерентное излучение.

На рис. 5 приводится схема, поясняющая поглощение, спонтанное и индуцированное излучение. Частица, находящаяся в основном состоянии (черный кружок на рис. 5,*а*), поглощает фотон (волнистая стрелка) и возбуждается, т. е. переходит на более высокий энергетический уровень (белый кружок). Возбужденная частица (белый кружок на рис. 5,*б*) может затем спонтанно излучить энергию в виде фотона и возвратиться в основное состояние.

Но возбужденную частицу (белый кружок на рис. 5,*в*) можно заставить излучить энергию в виде фотона под воздействием внешнего фотона (волнистая стрелочка слева), тогда, кроме этого индуцирующего фотона, появится второй фотон с той же длиной волны (волнистые стрелки справа), а частица возвратится в основное состояние. Таким образом, под воздействием слабого, подлежащего усилению сигнала возбужденные частицы вещества отдают приобретенную ими избыточную энергию в виде индуцированого излучения.

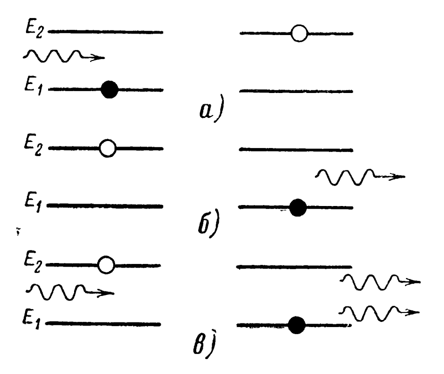


Рис. 5. Схема процесса поглощения, спонтанного и индуцированного излучения.

Подчеркнем еще раз, что основным отличием спонтанного излучения от индуцированного является высокая степень когерентности. При спонтанном излучении, представляющем собой в основном статистический процесс, генерируются лишь шумы и фазовой когерентности не наблюдается. При индуцированном излучении происходит сложение амплитуд, в результате которого суммарная амплитуда синусоидальной волны возрастает, причем фазовая когерентность сохраняется.

Выходное излучение является узконаправленным, потому что испускаются лишь волны, тысячекратно отраженные и не испытавшие сколько-нибудь существенного отклонения от оси прибора. Излучение имеет большую мощность, так как в индуцированном излучении одновременно участвует большое число возбужденных частиц.

Наконец, если выходной сигнал усилителя по форме близок к плоской волне, то он является пространственным когерентным, потому что все волновые фронты плоские и перпендикулярны направлению распространения волн. Поскольку выходной сигнал ОКУ почти монохроматичен, он является когерентным и во времени. Это означает, что имеется строгое фазовое

соответствие между частью волны, испускаемой в один момент времени, и волной, излучаемой спустя некоторый определенный промежуток времени.

Схема оптического квантового генератора (ОКГ) состоит из тех же основных элементов, что и схема оптического усилителя: активной среды, объемного резонатора, источников возбуждения и питания. Назначение элементов схемы также аналогично назначению элементов схемы оптического усилителя. Небольшое отличие имеют зеркала и источник питания. Если в ОКУ оба зеркала делаются полупрозрачными, так как через одно из них на активное вещество вводится входной сигнал, а через другое — выводится усиленный сигнал, то в ОКГ только одно выходное зеркало делается полупрозрачным.

Второе отличие состоит в том, что для генератора требуется более мощный источник возбуждения, поскольку за счет него восполняются потери энергии в активном веществе и на стенках открытого резонатора и создается условие самовозбуждения системы.

Как только одна из частиц, находящихся на верхнем энергетическом уровне, переходит на нижний уровень, начинается лавинообразный процесс перехода всех частиц, находящихся на данном уровне, и возникает индуцированное излучение. Если поддерживается непрерывный переход частиц с нижнего энергетического уровня на верхний, то и генерация будет непрерывной. Если перевод частиц в верхнее энергетическое состояние не непрерывен, то генерация будет возникать, а затем срываться, как только заселенность верхнего уровня будет истощаться. В этом случае излучение будет носить импульсный характер. Выходное излучение ОКГ также отличается узконаправленностью, монохроматичностью, пространственной и временной когерентностью и значительной мощностью излучения.

Таким образом, между схемами усилителя и генератора имеется полная аналогия. При необходимости прибор, собранный по одной из схем, можно заставить работать как в режиме усиления, так и в режиме генерации, если имеется достаточно мощный источник возбуждения, которым можно управлять в требуемых пределах.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

БЛОК-СХЕМА И УСТРОЙСТВО

Типичная блок-схема оптического генератора приведена на рис. 6. Эта схема состоит из излучающей головки и системы питания, в которую входят: блок конденсаторов, выпрямительный блок, блок поджига и пульт управления.

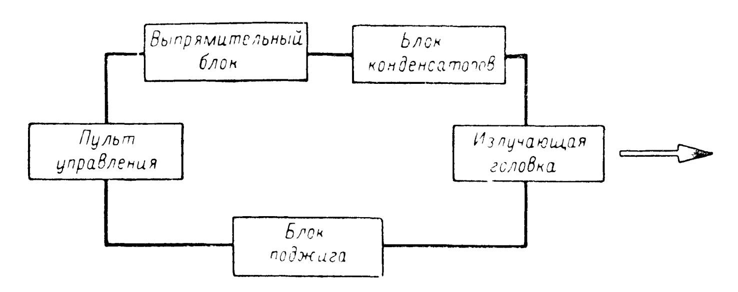


Рис. 6. Блок-схема ОКГ на рубине.

Первым активным веществом (излучателем), которое использовалось в оптическом генераторе, был монокристалл рубина. Искусственный рубин представляет собой окись алюминия, в которой часть атомов алюминия замещена атомами хрома. Количеством хрома определяется цвет рубина, так, бледно-розовый рубин содержит 0,05% хрома, красный — 0,5%.

Кристалл растят в печах, затем полученную заготовку отжигают и обрабатывают, придавая рубину форму стержня. Торцовые поверхности стержня, обрабатывают с высокой степенью точности и затем полируют. При обработке торцовых поверхностей их делают

параллельными с точностью не менее 9″ и покрывают серебряным или диэлектрическим слоем с высоким коэффициентом отражения. Чистота поверхности соответствует 12 классу.

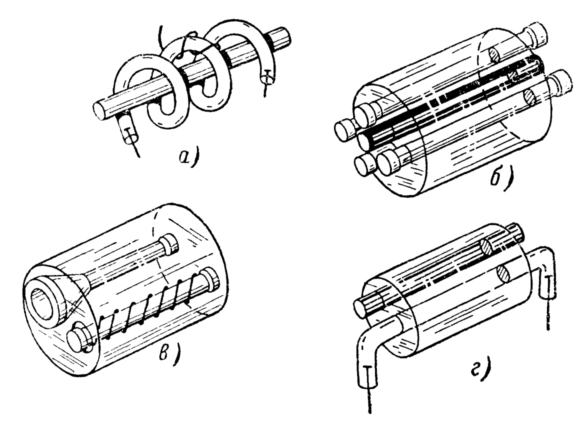


Рис. 7. Взаимное расположение рубинового стержня и ламп-вспышек.

Рубиновый стержень, подготовленный таким образом, размещают вблизи источника возбуждения. В качестве такого источника используется импульсная газоразрядная лампа, которая дает широкий спектр излучения с несколькими ярко выраженными полосами. Относительное размещение рубина и импульсной лампы может быть самое различное. На рис. 7 показаны четыре схемы возможного расположения стержня и лампы:

а — импульсная лампа, выполненная в виде спирали, охватывает рубиновый стержень;

б — рубиновый стержень находится между четырьмя импульсными лампами карандашного типа и все они вместе окружены алюминиевым корпусом-отражателем;

в — импульсная лампа карандашного типа и рубиновый стержень располагаются в фокусах эллиптического отражателя;

г — рубиновый стержень и П-образная импульсная лампа помещены в алюминиевый отражатель.

В качестве источника питания импульсной лампы используется конденсатор большой емкости, заряжаемый до требуемого напряжения от выпрямителя.

Конструктивно генератор состоит из двух основных узлов: излучающей головки и системы питания и управления.

Излучающая головка простейшего оптического квантового генератора приведена на рис. 8. Держатели рубина *4* сменные и изготовлены под рубиновые стерж-

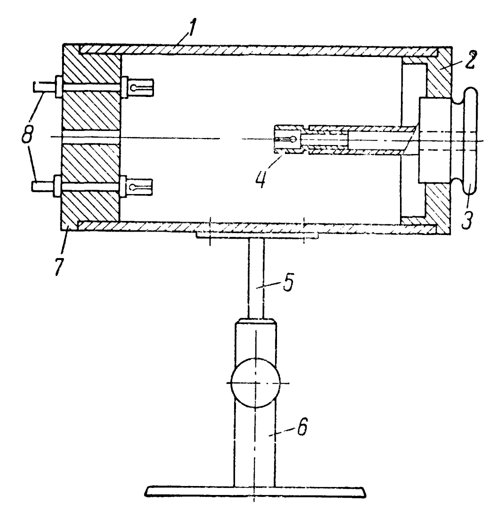


Рис. 8. Излучающая головка.

ни различных размеров и диаметров. Крепление держателей в осевой втулке *3* выполнено таким образом, что обеспечивается соосность кристалла, держателя и втулки в пределах $\pm 0{,}05$ *мм*. Осевая втулка может перемещаться в передней крышке *2* в пределах 30—40 *мм* для помещения кристалла в месте наибольшей интенсивности светового потока ламп накачки. На задней крышке *7* размещены четыре токоподвода *8* и гнезда для двух ламп-вспышек, которые используются в качестве источника возбуждения. Конструктивно эти элементы объединены цилиндрической полостью *1*, выполняющей роль рефлектора, концентрирующего световой поток от ламп-вспышек на рубиновом стержне. Внутренняя полость рефлектора покрыта окисью магния, имеющей коэффициент отражения около 0,9. Излучающая головка устанавливается на подставке с опорой *5*.

Рубиновый стержень изготавливают в виде либо параллелепипеда, либо цилиндра. Торцы кристалла покрываются диэлектриком. Они образуют резонатор. Выходное излучение в виде очень тонкого луча выходит наружу через одну из торцовых поверхностей.

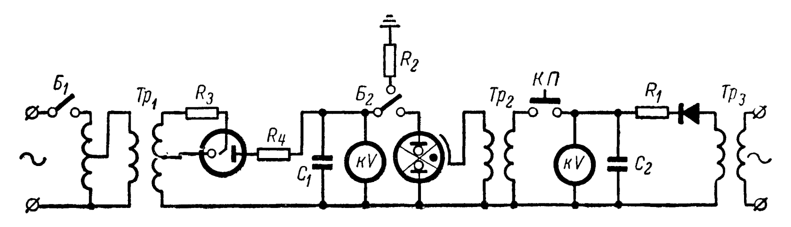


Рис. 9. Электрическая схема питания и управления импульсного ОКГ.

Система питания и управления этого генератора состоит из следующих основных блоков и узлов (рис. 9): высоковольтного выпрямителя, предназначенного для получения от промышленной сети выпрямленного тока напряжением 10 *кв*, блока зажигания ламп, служащего для получения импульса высокого напряжения, необходимого для начальной ионизации газа в лампах, блока питающих конденсаторов, измерительной аппаратуры и системы автоблокировки.

Схема работает следующим образом. Включением тумблера $Б_1$, смонтированного на пульте управления, подается напряжение на автотрансформатор. С движка автотрансформатора часть напряжения подается на высоковольтный трансформатор $Тр_1$, который может иметь такое соотношение витков первичной и вторичной обмоток, что обеспечивает подачу на выпрямительное устройство напряжения до 3 000 *в*. На входе выпрямителя включена батарея конденсаторов C_1 (от 3 до 9 штук) типа ИМ-5-150. Параллельно конденсаторам подключен киловольтметр, позволяющий контролировать напряжение, до которого заряжаются конденсаторы. Это напряжение через блокировочный контактор $Б_2$ подается на две импульсные лампы ИФК-2000. Контактор $Б_2$ управляется от дверцы шкафа, в котором размещены конденсаторы. При случайном или преднамеренном открывании шкафа конденсаторы через сопротивление R_2

разряжаются на землю. В рабочем состоянии импульсные лампы все время подключены к заряженным конденсаторам. Однако это не приводит к их вспышке, так как требуемое пробивное напряжение значительно выше. Для обеспечения вспышки ламп служит система зажигания. Она работает таким образом. Напряжение от сети подается на трансформатор Tp_3, с выходной обмотки которого снимается напряжение до 1 000 *в*. Выпрямленным током заряжается конденсатор C_2. После включения кнопки пуска — *КП*, установленной на пульте управления, конденсатор C_2 разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора Tp_2. Во вторичной обмотке индуцируется высокое напряжение, достаточное для получения пробоя воздушного промежутка в импульсной лампе. Это напряжение подается на внешний электрод лампы. Первичный импульс высокого напряжения ионизирует газ внутри разрядной трубки лампы и вызывает разряд основных конденсаторов через лампу, сопровождаемый интенсивным излучением. Это излучение и вызывает переход ионов хрома в возбужденное состояние.

Оптический квантовый генератор на рубине требует для своей работы значительное количество электроэнергии. Так, например, лучшие из образцов зарубежных генераторов имеют световой к. п. д. не более 1—2%. Излучаемая мощность генераторов достигает 10—1 000 *квт* в импульсе, поэтому мощность световой вспышки, необходимая для перевода ионов хрома на верхний энергетический уровень, должна быть на один-два порядка выше. Это может быть обеспечено только при использовании импульсных газоразрядных ламп, ибо мощность их излучения на несколько порядков выше, чем у самых мощных источников постоянного излучения. В то же время питаются они от источников энергии сравнительно небольшой средней мощности. Импульсные лампы дают мгновенные мощные вспышки, получаемые при разряде конденсаторов большой емкости при значительном напряжении между электродами лампы. Во время разряда, длящегося 10^{-4}—10^{-5} *сек*, выделяется значительная энергия, возникает ионизация и свечение в лампе. В момент вспышки ток в лампе достигает тысячи ампер. Все это предъявляет повышенные требования к электрической схеме питания и управле-

ния, особенно в отношении обеспечения условий техники безопасности.

В некоторых конструкциях ОКГ используются импульсные кварцевые лампы типа ИФК-2000, представляющие собой газоразрядный источник мощных световых вспышек многократного действия. Лампа имеет форму трубки с запаянными в ее концах основными электродами, концы которых служат выводами и соединены со схемой питания. Электродом зажигания служит никелевая проволока диаметром 0,4—0,5 *мм*, навитая снаружи на разрядную трубку.

Вспышка лампы происходит в момент подачи на ее внешний электрод высокого напряжения от импульсного трансформатора. Высоковольтный импульс ионизирует газ и вызывает разряд конденсатора через лампу. Без поджигающего импульса лампа при нормальном напряжении не зажигается.

Приводим основные параметры лампы ИФК-2000. Номинальная энергия вспышки (в джоулях) — 2 000 в режиме А, 400 в режиме Б и 400 в режиме В. Номинальная емкость питающего конденсатора (в микрофарадах) — соответственно 16 000, 8 000, 800. Номинальное напряжение на конденсаторе (в вольтах) — соответственно 500, 320 и 1 000. Длительность вспышки (в миллисекундах) соответственно 4, 2 и 0,25. Наименьший интервал между вспышками (в секундах) соответственно 15, 1,33 и 1.

В зарубежных ОКГ применяют ксеноновые лампы-вспышки LFT-4, имеющую длину 7,6 *см* и энергию вспышки 800 *дж*, и LFT-5 с параметрами соответственно 15,2 *см* и 2 000 *дж*.

На рис. 10 изображены излучающая головка и высоковольтный выпрямительный блок. Укрепляемая на передней крышке осевая втулка с держателем и рубиновым стержнем вывернута и расположена возле подставки. Энергопитание генератора осуществляется от трех отдельных блоков: высоковольтного выпрямительного блока, блока поджига ламп и блока конденсаторов. Все конденсаторы размещены в металлическом шкафу, имеющем блокировку, разряжающую конденсаторы при намеренном или случайном открывании шкафа.

Улучшенная конструкция излучающей головки представлена на рис. 11. Рефлектор излучающей головки

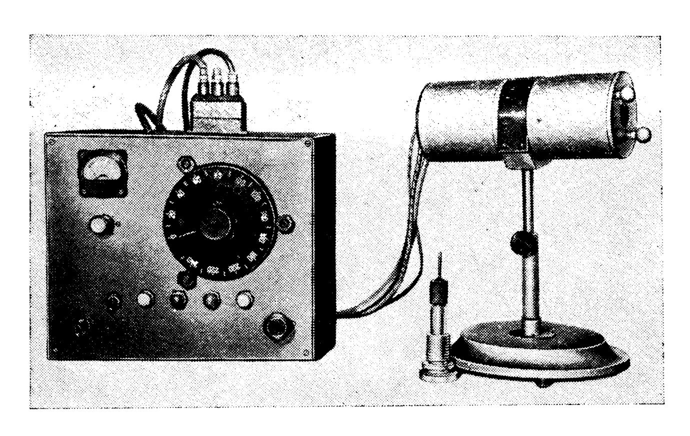


Рис. 10. Излучающая головка и пульт управления ОКГ на рубине.

выполнен в виде эллиптического цилиндра, в одной фокальной оси которого расположена импульсная лампа карандашного типа, в другой — рубиновый стержень. Такое конструктивное выполнение излучающей головки позволяет пропустить весь световой поток лампы-вспышки через рубиновый стержень. В этом случае пороговая энергия возбуждения меньше по величине, чем это требуется для первого случая выполнения излучающей головки. Однако изготовить эллиптический отражатель довольно сложно.

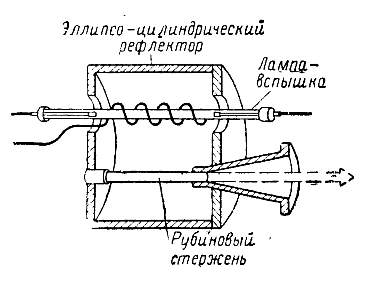


Рис. 11. Излучающая головка с эллипсо-цилиндрическим рефлектором.

Существует несколько вариантов конструкции излучающей головки, обеспечивающих при подводимой энергии 200—320 *дж* минимальные пороговые значения, необходимые для когерентного излучения. Так например, при использовании лампы-вспышки карандашного типа с наружным диаметром 6 *мм* и расстоянием между электродами 37 *мм*, расположенной параллельно рубиновому стержню на расстоянии 1 *мм* от него и обернутой слоем алюминиевой фольги или окиси магния, для достижения порогового значения возбуждения требуется входная энергия 200 *дж*.

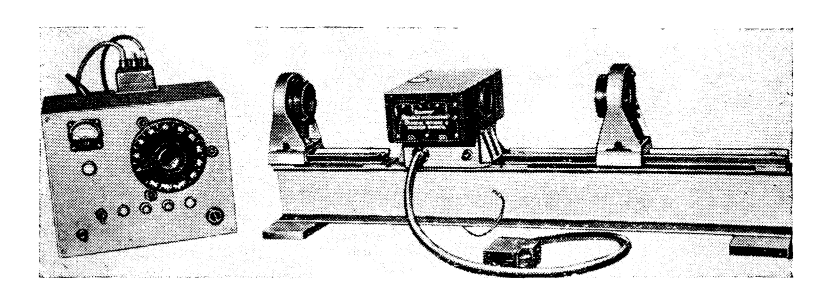


Рис. 12. Генератор ГСИ-1.

В других конструктивных вариантах используется разное число ламп-вспышек П-образного типа, расположенных вокруг рубинового стержня так, что их цилиндрическая рабочая часть параллельна оси стержня. В вариантах с двумя и четырьмя П-образными лампами пороговое значение возбуждения достигается при подаче на вход лампы энергии 320 *дж*; длительности импульсов при этом равны 250—200 *мксек* соответственно.

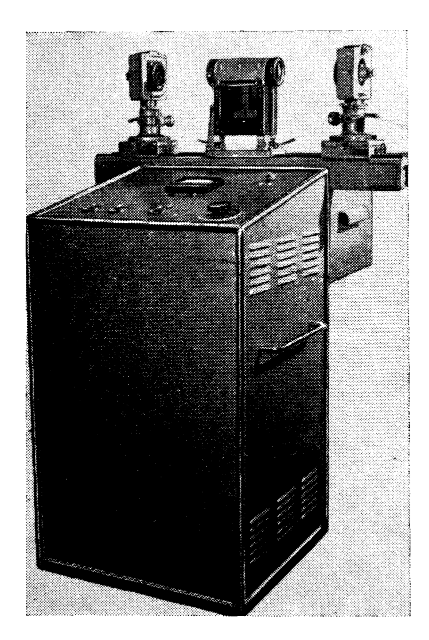


Рис. 13. Генератор ГОС-100.

На рис. 12 и 13 показаны отечественные генераторы ГСИ-1 и ГОС-100. В них в качестве активного вещества использовано неодимовое стекло. В первом — параллелепипед с размерами $8 \times 45 \times 150$ *мм*; во втором — цилиндр диаметром 25 *м* и длиной 120 *мм*. Источником возбуждения в ГСИ-1 служат восемь импульсных ламп типа ИФК-2000. Излучаемая энергия соответственно 75 и 100 *дж*. Длительность импульсов соответственно 0,7 и 1,5 *мсек*. Оба генератора излучают на волне 1,06 *мк* и весят с блоком питания 200 *кГ*.

На рис. 14 показан

Таблица 1

Характеристика	Тип генератора			
	2H2	2H2C	LH3	LHM1
Излучаемая энергия, *дж*	1,1	1—3 (с охлаждением)	7—20 (с охлаждением)	50—60
Потребляемая энергия, *дж*	500	500	2 000	2 000
Активное вещество	Рубиновый стержень длиной 8,25 и диаметром 0,635 *см* с диэлектрическим покрытием	Рубиновый стержень	Рубиновый стержень длиной 16,8 и диаметром 0,95 *см* с диэлектрическим покрытием на одном конце	Рубиновый стержень длиной 16,8 и диаметром 1,27 *см*
Рефлектор	Цилиндрический с посеребренной полированной поверхностью	Цилиндрический с посеребренной полированной поверхностью	Эллиптический цилиндр с посеребренной полированной поверхностью	Четырехэллиптический цилиндр с общей фокусной осью

Продолжение табл. 1

Характеристика	Тип генератора			
	2Н2	2Н2С	LН3	LНМ1
Возбуждение	Лампа-вспыщка LFT-4	Лампа-вспышка LFT-4	Лампа-вспышка LFT-5	Четыре лампы-вспышки LFT-5
Источник питания	LPS-1 до 800 *дж*	LPS-1 до 800 *дж*	LPS-1 до 2 000 *дж*	—
Размеры излучающей головки, *см*	20,3×12,7×18,4	20,3×12,7×18,4	22,8×15,2×27,9	—
Вес излучающей головки, *кг*	5	5	6	—
Размеры блока питания, *см*	120×60×50	120×60×50	120×60×50	—
Вес блока питания, *кг*	140	140	190	—

малогабаритный генератор «Раздан», а на рис. 15— ОКГ с высокой энергией излучения. В этих ОКГ активным веществом является синтетический рубин. Источником возбуждения — соответственно спиральная лампа и две цилиндрические лампы. Излучаемая энергия соответственно 3 и 60 *дж.* Оба генератора излучают на длине волны 0,6943. Длительность импульсов соответственно 0,5 *мсек* при частоте повторения 2 *имп/сек* и 1 *мсек.* Вес генератора «Раздан» — 27 *кГ.*

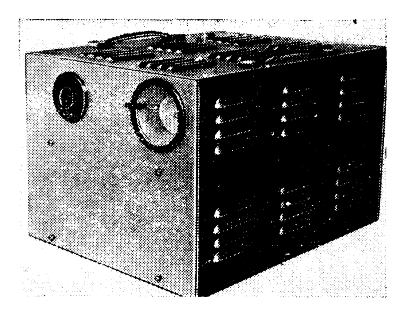


Рис. 14. Малогабаритный генератор на рубине «Раздан».

Данные о некоторых образцах зарубежных ОКГ приведены в табл. 1.

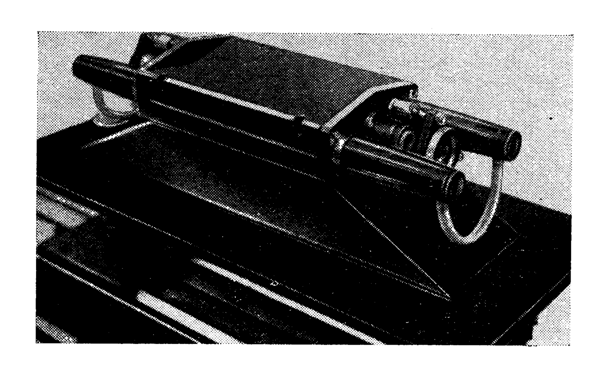


Рис. 15. Рубиновый генератор с высокой энергией излучения.

АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Твердые активные вещества-излучатели разделяют на кристаллические, полупроводниковые и аморфные (стеклянные).

Наиболее изученными и отработанными являются кристаллические излучатели. Чаще всего кристаллы изготавливают в виде полированных стержней с квадратным, шестиугольным или круглым сечением. Торцовые поверхности, кроме того, покрываются отражающи-

ми покрытиями. Наибольшее распространение получили кристаллы рубина диаметром от 0,5 *см* до нескольких сантиметров и длиной от 10 до 50 *см*. Рубин излучает на волне 6 943 Å при комнатной температуре, а при охлаждении до температуры 77° К — на волнах 7 009 и 7 091 Å. От рубиновых стержней при использовании оптического затвора удалось получить импульсы излучения мощностью 50 *Мвт* при длительности 10 *нсек*.

В оптических квантовых генераторах могут применяться также другие кристаллические материалы, например кристаллы различных галоидных соединений, солей вольфрамовой, титановой и молибденовой кислот и материалы с примесью редкоземельных элементов. Излучение этих материалов лежит в широком диапазоне от 6 943 до 26 000 Å и может быть как импульсным, так и непрерывным.

Для увеличения эффективности работы используют кристаллы со специальными покрытиями. Например, выращиваются рубиновые кристаллы с сапфировым покрытием, представляющие собой единую структуру с рубином в виде стержня. Преломляющее действие, оказываемое оболочкой на свет возбуждения, увеличивает активность рубиновой сердцевины, а также способствует лучшему охлаждению рубина. Стержни с сапфировой оболочкой по всей длине имеют малую пороговую энергию генерации (50—80 *дж*).

Большое значение для характера выходящего излучения имеет ориентация кристалла, т. е. расположение оптической оси кристалла относительно оси стержня. В том случае, если они параллельны, ориентация нулевая. Стержни с нулевой ориентацией дают круговую или эллиптическую поляризацию луча. Стержни с ориентацией 90° (оптическая ось перпендикулярна оси стержня) дают излучение, поляризация которого имеет одно направление. Стержни с нулевой ориентацией более подходящи для работы при температуре 77° К, а стержни с перпендикулярной ориентацией более подходят для работы при комнатной температуре.

К кристаллическим излучателям предъявляют жесткие требования. Например, для рубина с плоскими параллельными торцами необходимо выполнить следующие требования:

ориентация оси кристалла должна иметь точность в пределах 10″;

торцовые поверхности должны быть отполированы так, чтобы обеспечить их плоскостность до 0,1 длины волны линии натрия;

отклонение от параллельности торцовых поверхностей не должно превышать 3″;

допуск на длину стержня +0,13 *мм*;

допуск на диаметр ±0,025 *мм*;

допуск на отклонение от угла 90° между торцовыми плоскостями и цилиндрической внешней поверхностью ±1″.

В процессе обработки (полировки и притирки) стержней их геометрические параметры необходимо все время контролировать. Ориентацию проверяют с помощью рентгеновского дифрактометра, плоскостность с помощью интерферометра, а параллельность контролируют, используя автоколлиматор.

Одним из весьма перспективных направлений в области оптических квантовых приборов является разработка излучателей на основе различных сортов оптического стекла. Так как коэффициент усиления квантовой системы зависит от пути, проходимого возбуждающим потоком в системе, то чем больше этот путь, тем большее число возбужденных частиц участвует в излучении и тем больший поток можно получить на выходе системы. Размеры кристаллических активных веществ ограничены возможным ростом кристалла, чем ограничивается излучаемая мощность ОКГ. Поэтому были развернуты исследования возможностей использования различных новых сортов стекла в качестве излучателя. Стеклянная активная среда может иметь бо́льшие размеры, чем кристаллы, и быть изготовлена любой формы, требуемой для достижения наибольшей эффективности прибора.

В настоящее время как в СССР, так и в США уже получены образцы стеклянных излучателей. Так, например, бариево-хромовое стекло с примесью неодимия дает излучение на длине волны 10 600 Å при комнатной температуре. Было получено также когерентное излучение на волне 10 150 Å в литий-магний-алюминиево-силикатном стекле, активированном иттербием, а также

на силикатном стекле, активированном гадолинием. Излучение наблюдается на волне 3 125 Å, ширина линии излучения составляет 55 Å.

Использование полупроводников в качестве активных веществ для оптических квантовых приборов открывает возможность получения высокого к. п. д. и обеспечения широкой полосы модуляции излучения. Действие такого генератора основано на создании фотонной эмиссии в результате индуцированного «впрыскивания» (инжекции) электронов через полупроводниковый слой. В качестве активного вещества в этом случае используется арсенид галлия. При высокой плотности тока через переходный слой наблюдается инфракрасное излучение на волне 8 420 Å. Если полупроводниковый материал обработать и придать ему форму куба или параллелепипеда, а противоположные грани отполировать, то выходное излучение становится направленным и когерентным.

Для создания полупроводникового ОКГ может быть также использован кремний с примесью индия, фосфид галлия и сурьмянистый галлий.

ОТКРЫТЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Открытый резонатор выполняет три задачи:

концентрирует электромагнитную энергию требуемой частоты для обеспечения большого времени взаимодействия с возбужденными частицами активного вещества;

обеспечивает многократное отражение электромагнитной волны, благодаря чему достигается требуемый коэффициент положительной обратной связи, необходимый для генерации;

обеспечивает очень острый резонанс при генерировании колебаний.

Благодаря большой добротности резонаторов, применяемых в ОКП, выходная полоса частот становится очень узкой по отношению к ширине полосы резонансного поглощения активного вещества.

По схемному выполнению открытые резонаторы делятся на резонаторы с использованием рабочего тела излучателя, резонаторы с вынесенными зеркалами и резонаторы с переменной добротностью.

Большинство резонаторов, используемых в ОКГ, образовано двумя плоскими зеркалами, установленными друг против друга. Эти зеркала имеют серебряное либо диэлектрическое отражающее покрытие, состоящее из нескольких слоев диэлектрика, каждый из которых обладает различными оптическими характеристиками. По сравнению с диэлектрическим покрытием серебро имеет меньшую отражательную способность, что приводит к сравнительно большим потерям, особенно в том случае, когда оно применяется для покрытия торцов кристалла рубина, работающего на большом уровне мощности. Кроме того, в процессе эксплуатации серебряные покрытия портятся и их необходимо заменять, чтобы избежать падения выходной мощности и увеличения энергии, потребной для генерации.

Диэлектрические покрытия при эксплуатации не ухудшают своих свойств, и им в настоящее время отдают предпочтение.

Трудности юстировки одного плоского зеркала относительно другого привели к тому, что стали использовать не плоские зеркала, а сферические. В этом случае резонатор образуется двумя сферическими зеркалами, расположенными друг от друга на расстоянии, равном удвоенному радиусу их кривизны. Такой резонатор по сравнению с резонатором, образованным плоскопараллельными зеркалами, имеет меньшие дифракционные потери и требует более низкой мощности возбуждения; кроме того, юстировка сферических зеркал сравнительно более легкая.

Если резонатор образован зеркалами, оси и фокусы которых совпадают, то он называется *конфокальным*; если совпадают оси и центры кривизны зеркал, то резонатор называется *концентрическим*.

Иногда одно из зеркал, образующих открытый резонатор, заменяют призмой, устанавливаемой так, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение.

В последнее время получили применение резонаторы с вынесенными зеркалами. Излучатель в этом случае обрабатывается и полируется, но не покрывается серебром или диэлектриком. Зеркала, образующие открытый резонатор, изготавливают отдельно. Затем излучатель и зеркала объединяются в единую конструкцию, которая предусматривает юстировочное приспособление, обеспе-

чивающее возможность установки одного зеркала параллельно другому с высокой точностью.

Если система зеркал расположена таким образом, что обеспечивает распространение излучения по замкнутому кругу, то она образует так называемый **кольцевой резонатор**.

Иногда между излучателем и одним из зеркал помещают оптическое устройство с регулируемой прозрачностью. Этим обеспечивается возможность регулировать добротность открытого резонатора в широких пределах и, следовательно, управлять излучением генератора.

СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Системы возбуждения, или, как их называют, генераторы «накачки», предназначенные для перевода активного вещества из равновесного состояния в возбужденное, можно разделить на следующие четыре типа в зависимости от характера воздействия на активное вещество: системы возбуждения с помощью светового поля, системы возбуждения потоком электронов, системы возбуждения потоком радиоактивных частиц, химические системы возбуждения.

Наиболее широкое распространение получил первый способ возбуждения. Он применяется в основном в генераторах, в которых в качестве активного вещества используются кристаллы.

Система возбуждения, использующая для воздействия на активное вещество световое поле, обычно состоит из двух основных элементов: источника света и рефлектора. Если источник света представляет собой газоразрядную спиральную лампу, то рефлектор обычно выполнен в виде цилиндра. Если же источником света является газоразрядная лампа карандашного типа, то рефлектор выполнен в виде эллиптического цилиндра, по одной фокальной оси которого располагается лампа, а по другой — рубиновый стержень. При таком расположении источника света и рубинового стержня весь световой поток от лампы, отразившись от эллиптической поверхности отражателя, соберется в другой фокальной оси, т. е. там где расположен рубиновый стержень.

Значительное увеличение концентрации энергии возбуждения на активном веществе может быть получено

также при использовании рефлектора, имеющего полиэллиптическое сечение. В этом случае расположенный вдоль общей фокальной оси рубиновый стержень может облучаться одновременно несколькими лампами накачки. Наилучшими условиями для полного использования энергии лампы возбуждения в таком отражателе будут: возможно больший «диаметр» эллиптического отражателя, минимальный диаметр лампы и минимальный диаметр излучателя. Для этого случая при небольших допущениях можно считать, что поток энергии на поверхности активного вещества постоянный, а векторы потока направлены перпендикулярно оси активного вещества.

Установлено, что оптимальным вариантом является рефлектор четырехэллиптического сечения. При соответствующем выборе размеров резонатора эффективность каждой из четырех ламп составляет 75% от эффективности лампы с моноэллиптическим сечением рефлектора. В качестве примера можно указать рефлектор четырехэллиптического сечения, который использовался в США при экспериментах по оптической локации Луны. Рефлектор имеет длину 150 *мм*, определяемую размерами ламп карандашного типа. Размеры сечения составляют 406×406 *мм*, отношение длин полуосей эллипсов — 0,625.

Источником света, как правило, являются лампы-вспышки различной конструкции (спиральные, карандашные и др.) с наполнением ксеноном, аргоном и другими газами. Спиральные лампы могут изготовляться различной длины с энергией до 1 500 *дж*, а также с бифилярной навивкой, что обеспечивает размещение выводов с одной стороны лампы.

Лампы карандашного типа также могут изготавливаться любой длины и обеспечивают энергию излучения от 1 до 10 000 *дж*.

Система возбуждения может содержать и большее число ламп (до 10 ламп-вспышек) в зависимости от диаметра рубинового стержня. Конструкция системы должна предусматривать возможность перемещения ламп для обеспечения необходимого зазора между лампами и кристаллом. Это позволяет улучшить охлаждение кристалла. Группа ламп-вспышек закрывается отражателем для улучшения концентрации света на кристалле.

В некоторых системах возбуждения активное вещество и лампа-вспышка представляют собой единое целое: активное вещество является как бы оболочкой лампы-вспышки. При этом кристаллы или активированное стекло изготавливаются в виде полого цилиндрического стержня. Полость внутри стержня заполняется смесью ксенона и аргона, разряд в которой обеспечивает возбуждение активного вещества. Поверхность кристалла, за исключением излучающего торца, для уменьшения потерь энергии покрывается диэлектриком.

Такие системы возбуждения значительно эффективнее ранее использовавшихся. Они характеризуются порогом срабатывания, в 2—5 раз меньшим, чем порог для обычных систем возбуждения.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

Во всех случаях, когда нужно изменить сходимость луча после его первоначального формирования, используют собирающие и рассеивающие линзы, телескопические системы или зеркальную оптику. Для изменения направления луча под различными углами используют плоские зеркала. Если для формирования луча ОКГ применяют линзовый или зеркальный объектив, то его устройство и параметры аналогичны любой светооптической системе с заданным углом расхождения пучка лучей.

В некоторых схемах оптических квантовых генераторов для сужения луча применяют телескопические системы с обратным ходом лучей. При этом объектив телескопической системы обращен к выходному торцу излучателя, а окуляр — к облучаемому объекту. Уменьшение поперечного сечения (или угла расхождения) луча генератора пропорционально увеличению телескопической системы.

Если излучение оптического квантового генератора лежит в инфракрасной области с длиной волны более 1,3—1,5 *мк,* то линзовые системы должны изготовляться из специальных оптических материалов.

Особенности излучения оптических генераторов, а именно пространственная и временная когерентность, а также возможная высокая плотность излучения в узком пучке, заставляют заново анализировать возмож-

ность применения оптических систем и их влияние на излучение оптических генераторов. Проведены исследования в области специальной оптики, связанной с созданием и использованием практически когерентных источников света, которые могли бы в полной мере реализовать когерентные свойства ОКГ с учетом взаимодействия света с веществом при высокой фотонной плотности (известно, что при фокусировке когерентного излучения рубинового генератора на площадку порядка λ^2 энергия в объеме λ^3 достигает значения 140 *Мэв*). Эти исследования показали, что для решения основной задачи расширения или сужения поперечного сечения пучка когерентного света на несколько порядков можно использовать преломляющие системы с малым поглощением или отражательные системы, работающие с малыми углами.

ОПТИЧЕСКИЙ КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ПОЛУПРОВОДНИКЕ

За последнее время достигнуты значительные успехи в применении полупроводников в качестве активного вещества для ОКГ. Использование полупроводников открывает возможность применения нового, более эффективного метода возбуждения ОКГ, основанного на создании фотонной эмиссии в результате инжекции электронов через полупроводниковый переход. Впервые на возможность использования полупроводниковых материалов в оптических квантовых генераторах было указано в статье Н. Г. Басова, Б. М. Вула и Ю. М. Попова, опубликованной в 1959 г. Основное достоинство данного метода состоит в прямом преобразовании электрической энергии в свет, в результате чего можно ожидать высокого к. п. д. Кроме того, излучением генератора на полупроводнике легко управлять и оно может быть промодулировано в широком диапазоне частот путем управления током, протекающим через полупроводник.

В энергетическом спектре полупроводника уровни электронов при нормальных условиях лежат в пределах валентной зоны. Если через полупроводник пропускать электрический ток, то часть электронов переходит в свободную зону, что приводит к появлению в валентной зоне дырок. Энергия, требуемая для образования пары электрон — дырка, равна ширине запрещенной зоны. При рекомбинации электрона с дыркой, т. е. при пере-

ходе электрона из свободной зоны в заполненную, выделяется энергия в виде кванта светового излучения (фотона) или кванта звукового излучения (фонона).

При большом количестве рекомбинаций возможно возникновение индуцированного излучения. Это явление впервые наблюдалось у полупроводника с *p-n* переходом. При прохождении тока через *p-n* переход из арсенида галлия в прямом направлении часть электронов, находящихся в заполненной зоне, возбуждается и переходит в свободную зону с более высокой энергией. Одновременно дырки совершают переход в противоположном направлении. При рекомбинации электронов с дырками возникает излучение, частота которого, определяемая шириной запрещенной зоны лежит в оптическом диапазоне.

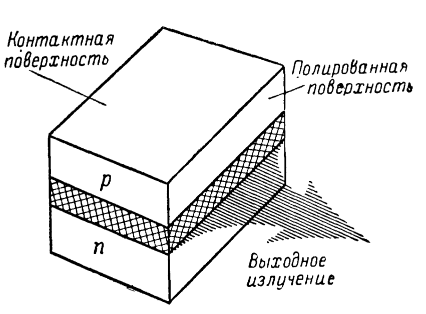


Рис. 16. Полупроводниковый диод, применяемый в ОКГ.

При малой плотности тока через *p-n* переход интенсивность излучения невелика, оно некогерентно и немонохроматично. При увеличении плотности тока, когда число фотонов, возникающих при рекомбинации, превышает число фотонов, поглощаемых в веществе, излучение становится когерентным, ширина спектральной линии излучения сужается, а интенсивность излучения резко возрастает.

Кроме того, для получения когерентного излучения необходимо, чтобы полупроводниковый переход был плоским, а материал полупроводника — чрезвычайно однородным.

Полупроводниковый диод, используемый в ОКГ, изготавливается в виде заготовки, имеющей форму куба или параллелепипеда, две противоположные грани которого делаются параллельными и обрабатываются с высокой точностью (рис. 16).

Две другие грани служат контактами, к которым прикладывается напряжение. Объем диода не превышает 1 $мм^3$.

Для получения излучения к контактным пластинам диода прикладывается напряжение импульсами длительностью от 5 до 20 *мсек*. Диод обычно охлаждается до температуры жидкого азота для отвода избытков тепла. Интенсивность и характер спектрального распределения излучения зависят от величины плотности тока, протекающего через *p-n* переход. Измерение характеристик излучения полупроводникового генератора на арсениде галлия показало, что максимум излучения лежит в области 8400 Å, ширина линии составляет около 125 Å при длительности импульса 50 *мсек* и плотности тока 104—10^6 $а/см^2$. При возрастании плотности тока максимум излучения смещается в сторону более длинных волн.

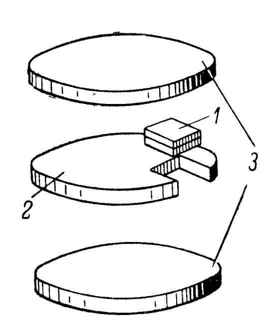


Рис. 17. Диод и теплоотводящее устройство в разобранном виде.

1 — диод; 2 — полупроводящий арсенид галлия; 3 — вольфрамовые диски.

В связи с тем, что характеристика полупроводникового оптического генератора в сильной степени зависят от температуры (так, например, при изменении температуры в диапазоне 4,2—125° К пороговое значение тока возрастает в 25 раз), были сделаны попытки разработать устройство, обеспечивающее необходимый отвод тепла от излучающего элемента.

На рис. 17 изображена конструкция устройства в разобранном виде. Диод *1* и тонкий диск полупроводящего арсенида галлия *2* заключены между двумя дисками из вольфрама высокой чистоты *3*. Все детали сварены с помощью предельно тонких слоев жесткого припоя толщиной 5—10 *мк*. Затем эта конструкция припаивается к медной пластине, которая в свою очередь крепится в вакуумном криостате.

Тепло отводится по следующим каналам: полупроводниковый переход — медь — охлаждающая деталь — охлаждающая жидкость; плоскость диода — верхний диск — полупроводящий арсенид галлия — нижний диск.

Выходная мощность непрерывного излучения такого генератора составляет 1 *вт*.

В последнее время ОКГ на полупроводниках стали

использовать в качестве источников возбуждения для оптических генераторов стержневого типа с целью повышения их к. п. д. Использование полупроводниковых диодов для возбуждения оптического генератора на рубине может повысить к. п. д. до 10%, для возбуждения генератора на фтористом кальции с примесью диспрозия — до 40—50%; для возбуждения генератора на вольфрамате кальция с примесью неодимия — до 85%.



Рис. 18. Внешний вид полупроводникового генератора «Луч-3».

В качестве активного вещества для полупроводниковых ОКГ могут использоваться арсенид галлия, кремний с примесью индия, фосфид галлия, сурьмянистый индий, сурьмянистый галлий и другие вещества.

Основными преимуществами оптического генератора на полупроводниковых материалах являются: высокий к. п. д., доходящий до 80—90% (правда, при небольших выходных мощностях), более простой метод возбуждения активного вещества, простота модуляции путем воздействия на ток возбуждения, более высокая надежность, экономичность и малогабаритность.

На рис. 18 показан внешний вид полупроводникового оптического генератора «Луч-3», изготовленного в Советском Союзе, который был показан на Лейпцигской ярмарке в 1965 г. В этом генераторе используется в качестве активного вещества кристалл арсенида галлия объемом 0,03 *мм*³, который находится в термостате с жидким азотом при температуре минус 196° С. Генератор работает в импульсном режиме с длительностью импульса 2 *мксек* и излучает на длине волны 0,844 *мк*. Мощность излучения в импульсе достигает 10 *вт*.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ГАЗОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

БЛОК-СХЕМА И УСТРОЙСТВО

Типичная блок-схема газового оптического квантового генератора приведена на рис. 19. Генератор состоит из двух основных узлов, излучающей головки и источника возбуждения.

Основными элементами излучающей головки являются газоразрядная трубка, зеркала резонатора и юстировочное приспособление. Излучающая головка предназначена для преобразования электрической энергии или энергии СВЧ поля в монохроматическое когерентное индуцированное излучение.

Источник возбуждения представляет собой преобразователь электрической энергии от промышленности сети в постоянный ток высокого напряжения или в СВЧ поле.

Вакуумная система является принадлежностью только лабораторных образцов генераторов. С ее помощью достигают необходимого вакуума в газоразрядной трубке и обеспечивают заполнение ее нужным составом газовой смеси. Наличие вакуумной системы необходимо при проведения экспериментов по исследованию зависимости выходной энергии от давления в газоразрядной трубке, исследованию ширины спектральной линии от количества компонентов газовой смеси. Промышленные образцы генераторов состоят только из излучающей головки и источника возбуждения.

Конструктивное выполнение излучающей головки одного из первых газовых квантовых генераторов показано на рис. 20. Эта схема так называемого генератора с внутренними зеркалами. Излучающая головка состоит

из газоразрядной трубки *1*, выполненной из кварца или ковара, плоскопараллельных зеркал *2*, двух сильфонов *3*, внешних электродов *4*, источника возбуждения *5* и двух защитных окон *6*. Видно, что трубка, зеркала и сильфоны образуют замкнутую полость, которая и заполняется газовой смесью. Одно из зеркал устанавливается параллельно другому с помощью специального устройства, называемого юстировочным приспособлением (на рисунке не показано). Сильфоны выбирают положение зеркал относительно трубки при юстировке излучающей головки. Газовый разряд в трубке, заполненной смесью гелия и неона, возникает при подаче на внешние электроды высокочастотного поля частотой 20—40 *Мгц*. Индуцированное излучение гелий-неоновой

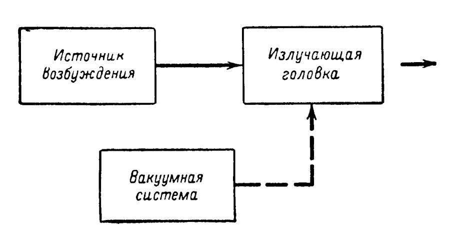


Рис. 19. Блок-схема лабораторного газового ОКГ.

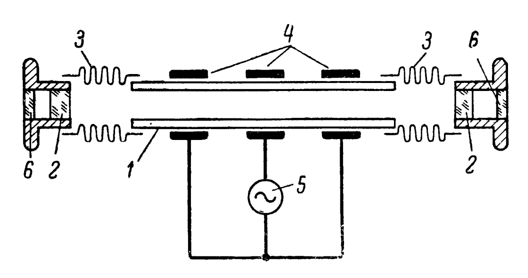


Рис. 20. Излучающая головка газового генератора.

смеси обеспечивается следующим образом. Атомы гелия в процессе газового разряда возбуждаются и совершают переход на верхний уровень. При столкновении атомов гелия с атомами неона последние возбуждаются и совершают переход на один из четырех верхних метастабильных уровней. Переход атомов неона на один из десяти возможных промежуточных энергетических уровней сопровождается излучением в инфракрасной или видимой области спектра. Это излучение направлено во все стороны равномерно, но значительного усиления до-

стигает только то, которое направлено перпендикулярно плоскопараллельным зеркалам. Через эти зеркала и защитные окна излучение выводится наружу.

Данной схеме конструктивного выполнения излучающей головки присущи крупные недостатки, которые заставили от нее отказаться. Эти недостатки состоят в следующем: система склонна к потере вакуума из-за многих соединительных разъемов; потеря зеркалами отража-

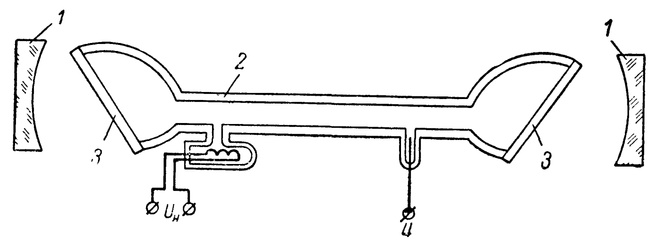


Рис. 21. Излучающая головка с внешними зеркалами.
1 — сферическое зеркало; *2* — газоразрядная трубка; *3* — выходные окна; *4* — электрод для подачи постоянного тока.

тельной способности под воздействием газовой плазмы (вследствие того, что они расположены внутри трубки) приводит к тому, что генератор перестает работать. С целью устранения указанных недостатков была предложена конструкция излучающей головки, в которой зеркала вынесены наружу. Схема этой головки приведена на рис. 21. В этом приборе плазменный разряд, образующийся внутри газоразрядной трубки, не действует на зеркала и они сохраняют отражательную способность длительное время. Излучающая головка не имеет сильфонов, и поэтому в ней длительное время сохраняется вакуум. Кроме того, данная излучающая головка питается не высокочастотным полем, как предыдущая головка, а постоянным током, который подается на специальные электроды, впаянные в отростки трубки. В этой головке применены зеркала со сферической отражающей поверхностью, что способствует более устойчивой работе излучающей головки.

ЮСТИРОВОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Одним из весьма важных элементов газового оптического генератора является устройство, с помощью которого обеспечивается установка одного зеркала па-

раллельно другому. Существуют самые различные конструкции этого устройства, но все они решают задачу— обеспечить перемещение зеркала относительно продольной оси трубки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Поскольку эти перемещения незначительны по величине, то они обеспечиваются с помощью микроме-

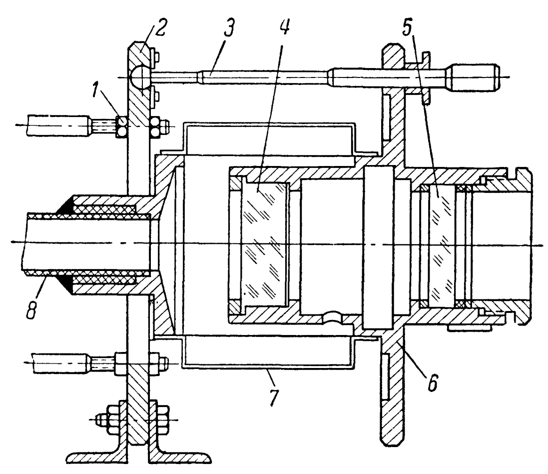


Рис. 22. Юстировочное приспособление.

1 — штанга; *2* — основание; *3* — микрометрический винт; *4* — зеркало с интерференционным диэлектрическим покрытием; *5* — защитное стекло; *6* — втулка зеркала; *7* — сильфон; *8* — трубка.

трических винтов, которых может быть от двух до четырех на каждое юстировочное приспособление. Один из вариантов юстировочного приспособления показан на рис. 22. Оно состоит из микрометрических винтов, сильфонов и пружин. Принцип работы устройства понятен из чертежа. Данная конструкция юстировочного приспособления позволяет производить установку зеркал вручную. В последнее время появились устройства, обеспечивающие автоматическую юстировку зеркал. Работа такого устройства основана на использовании явления магнитострикции. Конструктивное выполнение автоматического юстировочного приспособления состоит в следующем. Противоположные стороны двух держателей зеркал соединены между собой с помощью жесткой тяги, выполненной из магнитострикционного материала.

На эту тягу надеты электрические катушки, на которые подается электрический ток от усилителя. К усилителю подключен фотоэлемент, на который подается часть светового потока, излучаемого генератором. Известно, что величина светового потока зависит от точности установки зеркал, т. е. от качества юстировки. Чем лучше отъюстированы зеркала, тем больше излучаемый световой поток. Сигнал с фотоэлемента подается через усилитель на управляющие катушки, которые создают магнитное поле вокруг тяги, соединяющей зеркала. Под действием этого поля происходит изменение длины тяги, что в свою очередь приводит к тому, что противоположные стороны зеркал либо сближаются, либо расходятся до тех пор, пока на выходе излучающей головки не установится максимальный световой поток.

Другой вариант автоматического юстировочного приспособления не имеет тяг, соединяющих противоположные стороны держателей зеркал. Устройство этого приспособления аналогично приведенному на рис. 21, только в нем отсутствуют микрометрические винты, а на их месте размещены небольшие стержни, на которых расположены управляющие катушки. Сигнал на катушки поступает с усилителя, подключенного к фотоэлементу.

Поскольку автоматическое юстировочное приспособление является системой регулирования относительно сложной и дорогостоящей, то часто в лабораторных экспериментах обходятся ручными юстировочными приспособлениями. Чтобы произвести в этом случае юстировку, необходимо иметь в наличии коллиматор — оптическое устройство с перекрестием, дающее параллельный пучок света. Коллиматор и излучающая головка устанавливаются на оптической скамье таким образом, чтобы пучок света коллиматора проходил через газоразрядную трубку, которая должна находиться в холодном состоянии. В окуляр коллиматора наблюдают перекрестье самого коллиматора и перекрестье коллиматора, отраженное ближним зеркалом. Эти два перекрестья будут смещены одно относительно другого. Поворачивая микрометрические винты юстировочного приспособления, добиваются совмещения перекрестий. Это говорит о том, что зеркальная поверхность установлена перпендикулярно оптической оси коллиматора. Затем в окуляре коллиматора отыскивают перекрестье,

отраженное от дальнего зеркала, и с помощью микрометрических винтов совмещают с перекрестьем коллиматора. Таким образом и вторая зеркальная поверхность будет установлена перпендикулярно оптической оси коллиматора, следовательно, зеркала будут установлены параллельно одно другому.

После юстировки зеркал включают источник возбуждения, в трубке возникает газовый разряд, приводящий к непрерывному индуцированному излучению. Установив на пути его фотоэлемент, сигнал с которого подается на осциллограф, можно производить дополнительную юстировку по максимуму излучения на работающем генераторе.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВЫХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Основными характеристиками газовых квантовых генераторов являются длина волны излучения, излучаемая мощность, расходимость луча, спектр излучения.

К настоящему времени получено излучение от газовых генераторов более чем на 160 длинах волн в диапазоне от 0,594 до 100 *мк*. В качестве активного вещества применяются такие газовые смеси, как гелий-неоновая смесь, неоно-кислородная смесь, аргоно-кислородная смесь, а также все инертные газы, азот, бром, окись углерода и шестифтористая сера.

Мощность излучения газовых генераторов невелика. У первых образцов генераторов она составляла всего сотые доли ватта, у более поздних образцов доходит до единиц ватта в непрерывном режиме работы. Импульсные газовые генераторы обладают значительной выходной мощностью, доходящей до 50 *вт* при частоте следования импульсов 2 000 *гц*. Угловая расходимость излучения газовых генераторов незначительна, она лежит в пределах 0,01—0,001 *рад*. Ширина спектральной линии, или, как ее еще называют, спектральная частота, очень мала. Она составляет единицы и десятки килогерц у большинства генераторов, а у отдельных типов генераторов с дополнительными селекторами может быть доведена до нескольких герц.

К настоящему времени разработано несколько типов газовых генераторов. Генератор на смеси гелия и неона работает как в инфракрасной, так и в видимой

области спектра. Переход от возбуждения высокочастотным полем к возбуждению постоянным напряжением порядка 1 700 *в* позволил обеспечить большую стабильность и однородность разряда. Выходная мощность этого типа генератора лежит в пределах 0,1—0,2 *мвт*.

В генераторах с аргоно-кислородной и неоно-кислородной смесью используется принцип так называемой «диссоциативной передачи возбуждения». Возбужденные в результате газового разряда атомы аргона (неона), сталкиваясь с молекулами кислорода, вызывают их диссоциацию на два атома. Один из этих атомов оказывается в возбужденном состоянии и излучает электромагнитные колебания на волне 0,8446 *мк*. Выходная мощность такого генератора составляет 2 *мвт*.

Разработан генератор на парах цезия, работающий в непрерывном режиме на длинах волн 3,2 *мк* и 7,18 *мк*. Отличительную особенность этого генератора составляет крайне узкая спектральная линия излучения — всего 0,003 *гц*.

Некоторые параметры основных типов газовых оптических квантовых генераторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Газовые компоненты	Длина волны излучения, *мк*	Излучаемая мощность, *мвт*	Расходимость луча, *рад*	Спектральная линия излучения, *кгц*
Гелий-неоновая смесь	1,114 1,153 1,160 1,198 1,207	2—3	10^{-3}	1—10
Гелий-неоновая смесь	0,6328	3	10^{-3}	10
Аргоно-кислородная смесь	0,8446	1	10^{-3}	—
Пары цезия	7,180 3,2	1	$2\cdot10^{-3}$	10^{-6}
Благородные газы	1,618—2,189	0,5—3,0		

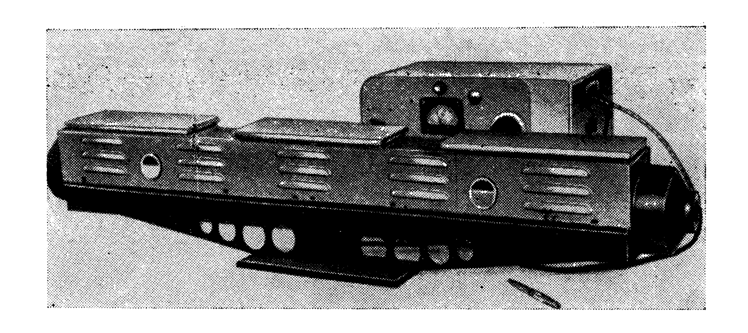


Рис. 23. ОКГ на гелий-неоновой смеси.

На рис. 23 представлен генератор, работающий на гелий-неоновой смеси и излучающий на длине волны 0,6328 *мк*; мощность излучения 3 *мвт*.

Параметры отечественных газовых генераторов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Тип генератора	Длина волны излучения, *мк*	Выходная мощность, *вт*	Мощность возбуждения, *вт*	Угол расхождения луча, *рад*	Размеры, *мм*
Лак-1	0,6328	$1\cdot10^{-3}$	40	—	390×60×40
ОКГ-11	0,6328	$1\cdot10^{-3}$	70	0,02	390×60×40
ЛГ-24м	0,6328 1,1530	$2\cdot10^{-3}$ $6\cdot10^{-3}$	90	0,02	1 218×248×148
ЛГ-34м	0,6328 1,1530	$8\cdot10^{-3}$ $10\cdot10^{-3}$	90	0,02	1 695×275×200

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ В ЛОКАЦИИ

Первые сообщения о разработке оптических квантовых генераторов привлекли к себе внимание специалистов, работающих в самых различных областях науки и техники.

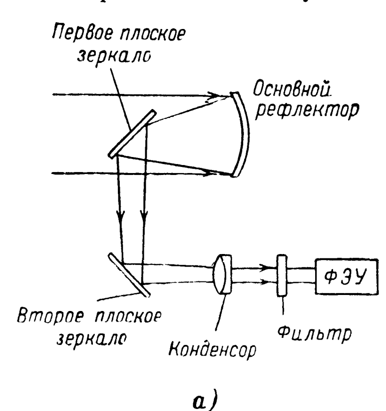
Повышенный интерес к оптическому излучению квантовых генераторов связан прежде всего с новыми перспективами в области локации и связи. Хорошо известно, что дальность действия локатора и точность определения угловых координат цели определяются в первую очередь углом расхождения луча, которым производится локация. Угол расхождения луча в оптическом диапазоне, так же как и в радиодиапазоне, определяется отношением длины волны к диаметру антенны (линзы). При равных размерах антенны направленность излучения в оптическом диапазоне в 10^5 раз выше, чем в сантиметровом диапазоне волн. Столь высокая направленность излучения открывает возможности создания оптических локаторов с разрешающей способностью, в тысячи раз большей, чем разрешающая способность радиолокаторов.

Известно, что концентрация энергии в пространстве обратно пропорциональна квадрату угла расхождения луча, поэтому при использовании оптических квантовых генераторов можно получить в тысячи раз большую плотность излучения, чем в радиодиапазоне. Следовательно, дальность действия таких локаторов возрастет. Известно также, что объем информации, который может быть перенесен каналом связи, пропорционален

его несущей частоте. Использование оптического диапазона открывает практически неограниченные возможности для передачи информации. Простейшие подсчеты показывают, что в принципе на участке длин волн от 0,4 до 0,8 *мк* может быть размещено, например, 80 миллионов телевизионных каналов. Отмечая достоинства оптического диапазона и оптических квантовых генераторов, одновременно следует отметить и их недостатки. Один из недостатков состоит в том, что оптическое излучение поглощается в нижних слоях атмосферы, поэтому дальность действия локационных и связных систем оптического диапазона при достигнутых мощностях излучения ограничена в сравнении с аналогичными системами радиодиапазона. Степень и характер поглощения зависят от состава и свойств атмосферы, которые значительно изменяются в зависимости от метеорологических условий, а также от высоты над уровнем океана. В спектре лучей, пропущенных слоем воздуха, имеется ряд полос поглощения, вызываемых водяными парами, углекислым газом, озоном и другими газообразными веществами, однако доминирующую роль играют пары воды. Поглощение оптического излучения парами воды в первую очередь и учитывают при оценке потерь излучения в атмосфере. В результате избирательного поглощения для спектральных кривых пропускания характерны «окна прозрачности». Наиболее ярко выражены окна в диапазоне 0,3—0,75 и 8—12 *мк*. В этом диапазоне пропускание составляет от 60 до 90% В верхних слоях атмосферы и космическом пространстве оптические излучения распространяются практически без потерь.

Идея создания оптических локаторов не нова. Однако в созданных в послевоенные годы локаторах применялся некогерентный источник излучения (вольтова дуга или газоразрядная лампа), что принципиально ограничивало возможность получения узкого светового луча. Эти локаторы применялись лишь для измерения малых расстояний. Применение в передающих и приемных устройствах локационных и навигационных систем квантовых приборов оптического диапазона волн открывает новые возможности. Считают, что такие системы наиболее эффективно смогут быть использованы в космическом пространстве, где они имеют следующие

основные преимущества: малые размеры и вес; большую дальность действия при относительно низкой потребляемой мощности (примерно 40% мощности, необходимой для радиолокатора аналогичного назначения); практически полное отсутствие шумов в приемнике; высокую точность измерений дальности и угловых координат. К этому следует еще добавить и значительно меньшую сложность оптических локаторов по сравнению с радиолокаторами. Все это показывает, что в космическом пространстве, в частности на спутниках, использование оптических локаторов даст больший эффект. Измерение расстояний между космическими объектами, скорости их сближения и т. д.— все это может быть выполнено с высокой точностью при помощи оптических систем. Некоторые зарубежные специалисты считают вполне возможным, что оптические локаторы вообще вытеснят радиолокационные системы в ближайшие 10 лет.



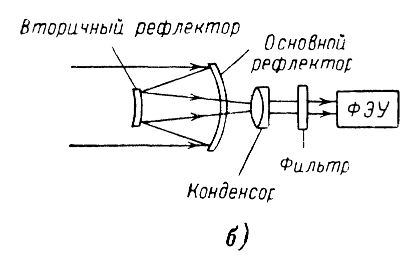


Рис. 24. Схемы приемных оптических систем.

а — с плоскими зеркалами; *б* — типа Кассагрена.

Вопросы построения реальных оптических локаторов занимают сейчас многих зарубежных специалистов. Какие характеристики могут быть получены от этих систем, какая оптика необходима, чтобы были обеспечены те или иные параметры — все это является предметом исследований многих фирм.

Так, за рубежом проведено исследование возможностей двух оптических систем: в одной в качестве приемной оптики использовались плоские зеркала (рис. 24,*а*), в другой — оптическая система типа Кассе-

грена (рис. 24,*б*). В обоих случаях источниками излучения служили одинаковые рубиновые ОКГ (размеры рубинового стержня — диаметр 6,3 *мм*, длина 50,8 *мм*). Накачка осуществлялась лампой-вспышкой (диаметр 76 *мм*, длина 175 *мм*). Схема передатчика (без источника питания, усилителей и схем индикации) была собрана таким образом, что ее можно было заключить в трубку диаметром 100 *мм*, длиной 180 *мм*.

Исследуемые системы имели следующие параметры: длина волны 6 934 Å, выходная мощность 10 *квт*, ширина луча 0,5 *мрад* (1,7′), длительность импульсов 1 *мсек*, частота повторения 1 *гц*. Отраженный от цели свет падает на основной рефлектор, после которого через конденсор и фильтр попадает на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

В системе Кассегрена основной рефлектор отражает падающий на него свет на вторичный рефлектор, от которого свет в свою очередь отражается и проходит через отверстие в центре основного рефлектора. Для уменьшения аберрации основному рефлектору была придана параболическая, а вторичному — гиперболическая форма. В целях уменьшения размеров системы основной рефлектор может быть короткофокусным, но, с другой стороны, это несколько ограничивает размещение вторичного рефлектора.

Если это ограничение вносит серьезные затруднения, то вместо оптической системы Кассегрена может быть использована система из плоских зеркал. В этом случае свет, падающий на основной рефлектор, направляется последним на плоское зеркало, расположенное под углом 45° к оси оптической системы. От этого зеркала свет через отверстие в трубке, в которой обычно заключены первые два оптических элемента, попадает на второе плоское зеркало, от которого он затем отражается. Если основной рефлектор выбран длиннофокусным, то положение первого зеркала является менее критичным, чем в системе Кассегрена. Более того, очень точная регулировка может быть осуществлена при помощи второго зеркала. Основной недостаток такой системы состоит в том, что большое фокусное расстояние основного рефлектора увеличивает размеры системы.

В обеих системах часть отраженного от цели света не попадает на основной рефлектор, поскольку на пути света расположен или вторичный рефлектор, или первое плоское зеркало. Это приводит к снижению чувствительности системы. Для повышения чувствительности и разрешающей способности системы в ней предусмотрено устранение фонового шума, создаваемого светом звезд и т. п. Для этой цели перед приемником устанавливается узкополосный фильтр (полоса 5—10 Å).

Появление ОКГ непрерывного излучения с применением метода внутреннего изменения добротности и высокой частотой повторения открыло практическую возможность создания оптических локаторов.

С помощью неоднородных магнитных полей удалось получить частоту повторения импульсов (ОКГ на флюориде кальция, активированного диспрозием) до 330 *кгц*. При этом пиковая мощность доходила до 20 *вт* при средней мощности 0,5 *вт*. Время нарастания импульса составляло 200 *нсек*, но специалисты считают, что оно вполне может быть доведено до 20 *нсек*.

Американскими учеными обсуждались возможности создания оптического локатора в такой срок, чтобы его можно было использовать при осуществлении полетов на Луну. Такой локатор смог бы заменить большое количество различной аппаратуры, особенно в устройстве, предназначенном для посадки на Луну, а именно: радиолокационный альтиметр для измерения высоты над лунной поверхностью; моноимпульсный радиолокатор для измерения расстояния и скорости сближения при встрече на орбите; световой маяк для поиска при встрече (учитывая высокую точность, которую может дать ОКГ, он может быть использован и для окончательной стыковки, а не только как источник видимого света); радиолокатор для измерения расстояния до выбранной площадки приземления; телефонную систему для связи между командным аппаратом и вторым аппаратом во время встречи на орбите.

Строчно-кадровый метод развертки луча широкодиапазонного оптического локатора позволяет с большой точностью определять размеры цели. Сущность этого метода заключается в том, что импульсный луч ОКГ должен отклоняться попеременно в горизонтальной

и вертикальной плоскостях на определенный угол. Длительность и амплитуда отраженных от цели импульсов будут характеризовать угловую ширину и угловую длину цели. При умножении этих значений на расстояние до цели можно определить линейные размеры последней. Устройство отклонения луча состоит из последовательно расположенных оптических призм, имеющих форму стержней длиной 1,27 *см*, выполненных из клинообразных секций двуокиси фосфата калия. При изменении напряжения, приложенного к призме, изменяется ее показатель преломления и угол выхода излучения генератора. Каждая призма отклоняет луч на доли миллирадиана. Шесть последовательно расположенных призм обеспечивает отклонение луча, достаточное для сканирования требуемого участка пространства.

На рис. 25 приведена блок-схема оптического локатора, предназначенного для определения дальности до наземных объектов или для проведения геодезических измерений. Локатор состоит из передатчика, приемника, синхронизатора и цифрового индикатора ЦИ. Три первых элемента размещаются в едином корпусе, представляющем собой «двухствольное ружье,» а последний находится в контейнере, который размещается за плечами оператора. Передатчик состоит из оптического квантового генератора импульсного действия, передающей оптической системы и полупрозрачного зеркала, предназначенного для отвода части энергии зондирующего импульса в счетно-решающее устройство. Приемник состоит из приемной оптической системы — интерференционного фильтра, ФЭУ и предварительного усилителя ПУ, сигнал с которого также подается на цифровой индикатор ЦИ. Этот сигнал выключает из работы счетно-решающее устройство. Приводим параметры одного из подобных локаторов:

Длина волны излучения	0,6943 *мк*
Мощность в импульсе	1 *Мвт*
Частота посылок	5 *имп/мин*
Ширина луча	0,5 *мрад*
Дальность действия	5—11 *км*
Длительность нормальной работы батарей без подзарядки	100 импульсов
Разрешающая способность по дальности	± 5 *м*
Разрешающая способность по углу . . .	1,9—2,7 *м* на дальности 10 *км*
Вес аппаратуры	20 *кг*

Более мощные оптические локаторы используются при исследовании атмосферы. С помощью таких локаторов удалось обнаружить скопления пыли на высотах 60—140 *км*.

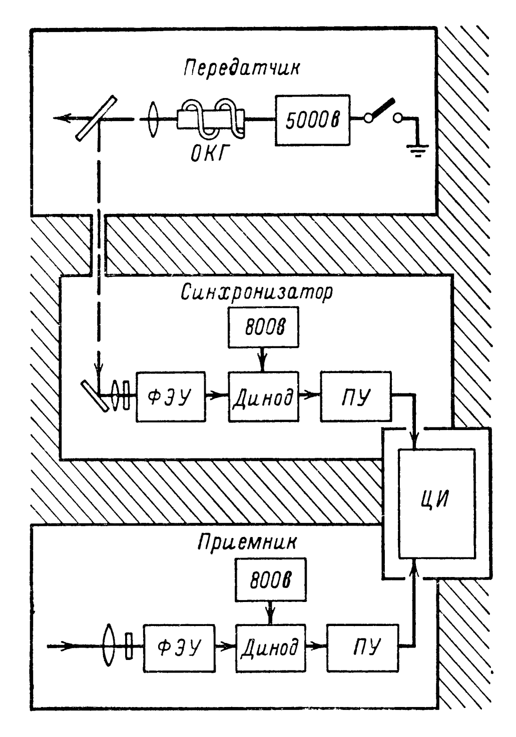


Рис. 25. Блок-схема портативного оптического локатора.

Особый интерес представляют генераторы, дающие излучение в сине-зеленой части видимого спектра. Колебания этого диапазона в меньшей степени поглощаются водой, что делает перспективным использование их для подводной локации. В настоящее время за рубежом разрабатывается оптическая система подводного обнаружения со сканирующим лучом, который в течение коротких промежутков времени поочередно освещает малые участки цели. Устройство развертки изображения синхронизировано с движением луча, облучающего цель.

и выполнено таким образом, что оператор наблюдает на экране локатора полностью освещенную цель.

Разработка и создание оптических локаторов для слежения за искусственными спутниками является чрезвычайно актуальной задачей.

Слежение за спутником с помощью обычных наблюдательных приборов возможно только в тех случаях,

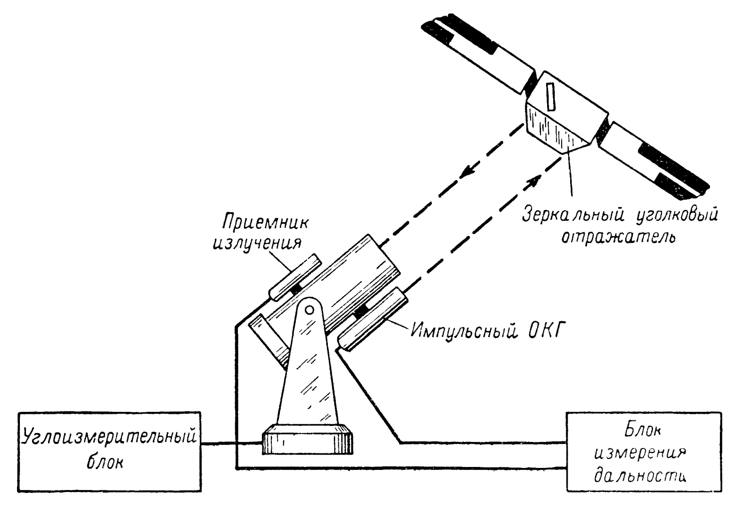


Рис. 26. Схема эксперимента по слежению за спутником S-66.

когда спутник освещен Солнцем, а наземные системы слежения находятся в тени. Однако для того чтобы получить необходимую геодезическую информацию, в частности, для уточнения распределения поля тяготения Земли, необходимо знать параметры орбиты не только на ограниченном отрезке движения, когда спутник освещен Солнцем, а и тогда, когда он находится в тени. Использование ОКГ позволяет получать информацию о параметрах орбиты как «ночью», так и «днем», что значительно расширяет диапазон измерений. В США в 1965 г. был поставлен эксперимент, который позволил ответить на некоторые вопросы, связанные с использованием ОКГ для связи и слежения в космосе. Рисунок 26 поясняет идею эксперимента. На оптическом следящем телескопе, направленном на спутник, размещен квантовый генератор света, периодически освещающий

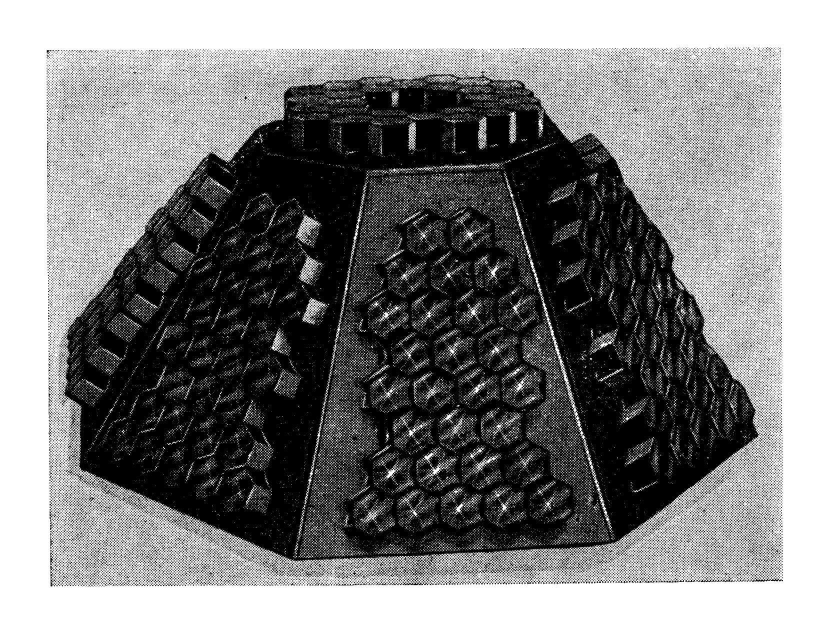


Рис. 27. Внешний вид рефлектора.

спутник. Установленный на спутнике рефлектор, изготовленный из зеркальных уголковых отражателей, отражает излучение ОКГ в сторону системы слежения. Излучение принимается фотоэлектронным умножителем. Детектированный сигнал используется для определения дальности до спутника и для выработки сигнала ошибки слежения.

Подобная система применялась для слежения за полярным ионосферным спутником S-66. Спутник оборудован системой магнитной стабилизации, удерживающей его таким образом, что ось спутника направлена вдоль магнитного поля Земли. Спутник медленно вращается вокруг этой оси. Зеркальный уголковый отражатель (рефлектор) помещен на поверхности, которая направлена в сторону Земли, когда спутник находится в северном полушарии. На рис. 27 показан внешний вид такого рефлектора, собранного из 360 зеркальных кубических уголков, имеющих в сечении 2,6 *см*. Излучение, попавшее на спутник, отражается в угле 10^{-4} *рад*.

На рис. 28 изображена схема передатчика следящего телескопа, включающего ОКГ и коллимирующую опти-

ку, позволяющую иметь угловую расходимость луча порядка 1 *мрад*. Окуляр, фокусируемый на перекрестке, и пентапризма предназначены для осуществления точного слежения за спутником с помощью оператора. Отражающая призма вращается с помощью электродвигателя со скоростью 12 000 *об/мин* и предназначена для обеспечения *Q*-модуляции. ОКГ работает с частотой 1 *имп/сек*, энергия импульса составляет 1 *дж*. Балли-

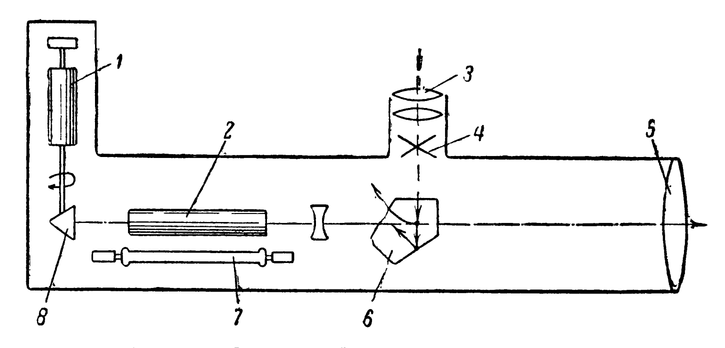


Рис. 28. Оптический квантовый передатчик.

1 — электродвигатель; *2* — рубиновый стержень; *3* — окуляр; *4* — перекрестье; *5* — объектив; *6* — пентапризма; *7* — лампа-вспышка; *8* — призма.

стическая камера (кинотеодолит), предназначенная для слежения за спутником, изображена на рис. 29. Приемное устройство располагается на месте кинокамеры.

Дальность до спутника, как и в радиолокаторах, определяется по времени запаздывания отраженного импульса относительно опорного. Зондирующий импульс передатчика используется для запуска развертки индикатора и высвечивания на экране опорного импульса. Отраженный спутником импульс также дает светящуюся отметку на экране. Расстояние между этими отметками на экране, определяющее время запаздывания отраженного импульса относительно опорного, пропорционально дальности до спутника.

Американскими учеными и инженерами было создано несколько наземных установок подобного типа, которые были размещены в различных точках. В конце 1964 г. стали проводиться эксперименты по наблюдению за спутником «Эксплорер-22». Однако первые результаты были неутешительны. Ученые не могли полу-

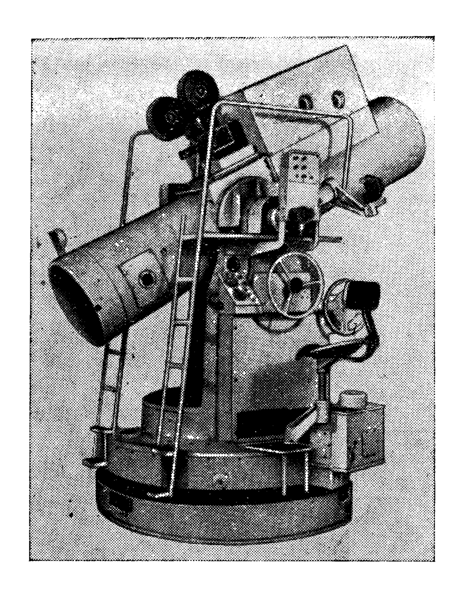


Рис. 29. Внешний вид баллистической камеры.

чить отраженного сигнала и объяснили это трудностью осуществления точного слежения и турбулентностью атмосферы. Весной 1965 г. появилось сообщение о том, что американцев опередили в их работе французские инженеры и ученые. Сотрудники обсерватории Сан-Мишель де Прованс провели серию экспериментов по наблюдению за тем же спутником, используя наземное оборудование и оптический квантовый генератор на рубине собственного изготовления. В генераторе применялась модуляция добротности, в результате чего, длительность зондирующего сигнала составляла $3 \cdot 10^{-8}$ *сек.*

В момент проведения эксперимента дальность до спутника составляла 1 517 *км* 992 *м.* Эта дальность была определена с точностью ± 8 *м.*

Еще большей дальностью действия обладают космические оптические локаторы, предназначенные для обследования поверхности Луны и других космических объектов. Такие локаторы, обладающие высокой разрешающей способностью по дальности, позволяет производить картографирование Луны и получать детальную топографическую карту отдельного небольшого участка лунной поверхности, на котором могут быть определены неровности кратеров высотою порядка 1,5—3 *м.* Для реализации этих возможностей необходимы следующие параметры оптической локационной установки: мощность оптического генератора в импульсе 1—10 *Гвт,* длительность импульса порядка наносекунд, частота повторения импульсов 1 000 *гц,* диаметр приемно-передающей оптической системы порядка 100 *см.*

В 1962—1963 гг. в СССР и США были проведены первые эксперименты по локации Луны. Локатор, разработанный в США, имеет в качестве источника излучения рубиновый оптический генератор с кристаллом длиной 150 *мм*. Облучение кристалла производится четырьмя импульсными лампами, установленными в полиэллиптическом рефлекторе (рис. 30). Излучение генератора фокусируется с помощью оптической системы с диаметром основного зеркала, равным 30 *см*. Излучаемая энергия в импульсе составляет 50 *дж*. Рубиновый стержень охлаждается до температуры жидкого азота.

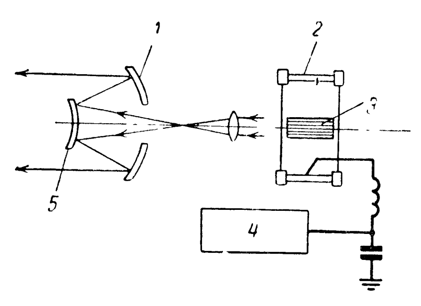


Рис. 30. Упрощенная схема передающего устройства аппаратуры для локации Луны.

1 — основное зеркало; *2* — импульсная лампа; *3* — рубиновый стержень; *4* — блок питания; *5* — второе зеркало.

Приемная часть локатора (рис. 31) состоит из приемной оптической системы кассагреновского типа

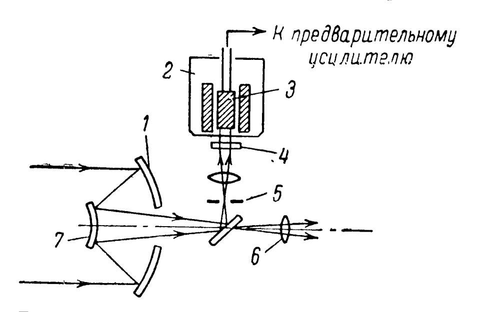


Рис. 31. Упрощенная схема приемного устройства для локации Луны.

1 — основное зеркало; *2* — криостат; *3* — ФЭУ; *4* — фильтр; *5* — диафрагма; *6* — окуляр; *7* — второе зеркало.

с диаметром основного зеркала 120 *см* и чувствительного элемента, в качестве которого используется ФЭУ. Перед чувствительным элементом размещается интерференционный фильтр, предназначенный для срезания феновых помех. Чувствительный элемент размещается

в криостате для уменьшения собственных шумов приемника. Приемная система имеет специальное устройство, предназначенное для наведения оптического локатора на заданную точку поверхности Луны.

Недавно в США разработана установка, использующая ОКГ непрерывного излучения для получения точ-

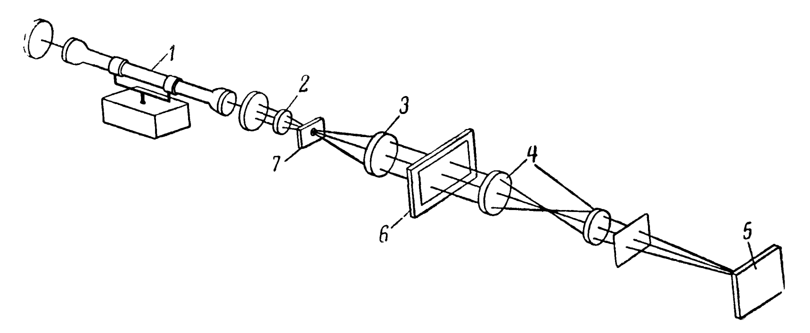


Рис. 32. Схема моделирования радиолокационных антенн.

ных диаграмм направленности радиолокационных антенн больших габаритов. Принцип действия установки состоит в облучении оптической модели антенны монохроматическим когерентным лучистым потоком и получении фотографий, показывающих влияние на форму диаграммы направленности как антенной решетки в целом, так и влияние интерференции между различными элементами решетки.

Установка содержит следующие узлы и элементы (рис. 32): газовый оптический квантовый генератор на гелий-неоновой смеси *1*, конденсор *2*, диафрагму с точечным отверстием *7*, коллимирующую линзу *4*, диапозитив *6*, на котором дано изображение исследуемой антенны, объектива *4*, экрана *5*.

ОКГ работает на длине волны 0,6328 *мк*, выходная мощность порядка сотой доли ватта. Диапозитив представляет собой фотографию точного чертежа антенны. В первом эксперименте моделировалась антенна радиотелескопа, предназначенного для сканирования солнечной поверхности, представляющая собой решетку из 97 элементов, расположенных по окружности диаметром 2 500 *м*. Отдельный элемент представляет собой параболическую антенну, диаметр которой равен 13,7 *м*.

Чертеж антенны был изготовлен на листе размерами 50×50 *см* и затем сфотографирован. Размер антенны на диапозитиве равнялся 25 *мм*. Заданный масштаб был выбран из тех соображений, чтобы при данной длине волны оптического генератора получить подобие для длины волны модулируемой антенны, равной 7,5 *см*.

Установка работает следующим образом: излучение ОКГ направляется на конденсор, необходимый для

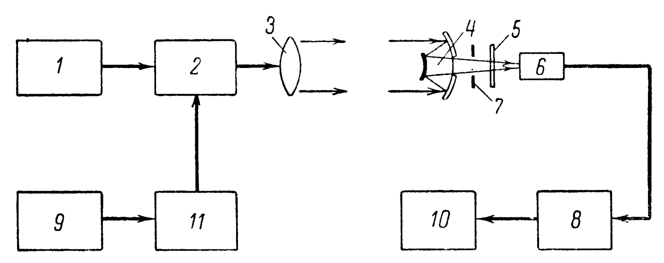


Рис. 33. Блок-схема телевизионной установки с передачей изображения по оптическому каналу.

фокусировки луча в плоскости диафрагмы с точечным отверстием, которая является пространственным фильтром. После диафрагмы пучок расходится и попадает на коллимирующую линзу, благодаря которой диапозитив освещается светом с плоским волновым фронтом. После диапозитива, который может быть изготовлен как на пленке, так и на пластинке, излучение попадает на объектив, который строит изображение диапозитива. Расположением фотоматериала в нужных точках можно получить диаграммы направленности антенны в требуемом масштабе. Описанным методом можно получать как фазовые, так и амплитудные диаграммы, для чего нужно соответствующим образом менять толщину материала диапозитива.

Применение в телевидении. В последнее время разработано несколько систем, в которых телевизионное изображение передается по оптическому каналу. Усилия ученых и инженеров были направлены на то, чтобы наращивать количество телевизионных программ в одном луче, т. е. реализовывать громадные информационные возможности сверхвысокочастотной несущей.

Простейшая телевизионная система была выполнена из готовых узлов и деталей. Блок-схема этой системы

приведена на рис. 33. Она включает в себя промышленный ОКГ *1*, два промышленных телевизора *9* и *10*, стандартный усилитель *11* и видеоусилитель *8*. Кроме того, в системе использованы приемная *4* и передающая *3* оптические системы, модулятор оптического излучения *2* и оптический фильтр *5*. Телевизионные сигналы, получаемые от первого телевизора, усиливаются и поступают на модулятор. (Видеосигналы снимаются с одного из каскадов видеоканала телевизионного приемника). Модулятор, стоящий на выходе излучения из ОКГ, обеспечивает амплитудную модуляцию лучистого потока. С помощью оптической системы промодулированное излучение направляется в сторону приемного устройства.

На приемной стороне излучение собирается приемной оптической системой зеркального типа, проходит через узкополосный оптический фильтр и диафрагму *7* и поступает на чувствительный элемент, в качестве используется фотоумножитель *6*. (Фильтр и диафрагма обеспечивают возможность передачи изображения в дневное время в условиях солнечного освещения.) Сигнал с ФЭУ, пройдя видеоусилитель, подается на кинескоп второго телевизора. Несмотря на наличие шумов, вносимых ОКГ и интенсивным световым фоном, имеющим место при работе в дневных условиях, изображение на экране второго телевизора было вполне удовлетворительным. Отличная четкость изображения, полученного при передаче по оптическому каналу, свидетельствует о хорошей переходной характеристике модулятора и связанных с ним электронных схем. Отсутствие «снегопада» говорит о хорошем соотношении сигнал/шум в данной системе.

Основным элементом, требующим к себе внимания, является амплитудный модулятор. В самом первом варианте системы использовалась ячейка Покельса, в которой напряжение модуляции подается на кристалл в направлении светового луча. Этот модулятор имеет два существенных недостатка. Один из них состоит в том, что для управления ячейкой необходимо высокое напряжение, доходящее до нескольких киловольт, а второй в том, что ячейку необходимо охлаждать, поскольку требуется отводить тепло, выделяемое в ней в результате приложения высокого напряжения.

В дальнейшем был разработан модулятор, в котором данные недостатки были значительно уменьшены. Вместо ячейки Покельса в модуляторе используется кристалл КДР (KH_2PO_4), который обладает хорошей оптической прозрачностью в интервале длин волн $2\,500 \div 12\,500$ Å. Для снижения модулирующего напряжения использовано следующее явление. Известно, что с увеличением площади поперечного сечения луча, про-

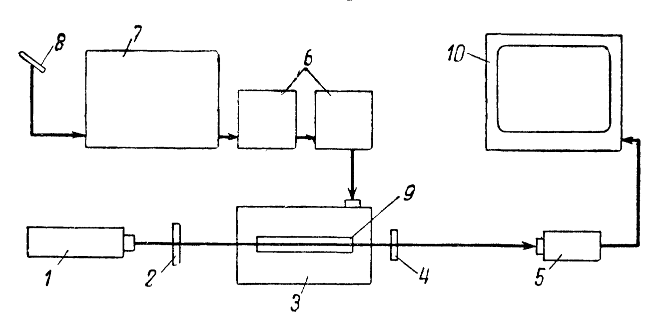


Рис. 34. Блок-схема многоканальной телевизионной системы.

ходящего через модулятор, растет величина модулирующего напряжения. Поэтому для снижения напряжения необходимо иметь очень узкий луч. Сужение луча обеспечивается дополнительной коллимирующей системой, на выходе которой поперечное сечение луча не превышает 1 *мм*. Апертура модулятора выбрана равной 2,5 *мм*, что обеспечивает простоту центрирования модулятора по отношению к лучу. Кристалл КДР помещен в металлический корпус для увеличения механической прочности. Диаметр модулятора равен 38 *мм*, а длина — 90 *мм*. Такое усовершенствование модулятора позволило снизить уровень мощности возбуждения на два порядка. Модулятор работает при напряжении всего 18 *в* и потребляет ток в 50 *ма*.

Летом 1965 г. появились образцы телевизионных систем, в которых один луч нес информацию пяти—семи телевизионных каналов. Блок-схема этой системы приведена на рис. 34. Система состоит из гелий-неонового оптического генератора *1*, работающего на длине волны 0,6328 *мк*, излучаемая мощность на одном типе колеба-

ний составляет 2 *мвт*. Излучение генератора направляется через четвертьволновую пластинку *2*, модулятор *3* и поляризатор *4* на приемное устройство *5*. В приемном устройстве в качестве чувствительного элемента используется кремниевый фотодиод, сигнал с которого подается на пять телевизионных установок *10*. Первоначальный сигнал принимается телевизионной антенной *8* и проходит через тройное усиление: в усилителе телевизора *7* и в двух дополнительных усилителях *6*. Такое значительное усиление необходимо для управления модулятором. Кристалл модулятора *9* имеет размеры 76×1×1 *мм*. Передача изображения велась по каналам: 66—75, 76—82, 182—186, 198—204, 210—216 *Мгц*.

ПРИМЕНЕНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

В настоящее время ОКГ используется в светотехнике, спектроскопии, при диагностике плазмы, а также при измерении длин и скоростей.

Интерферометрия. Вследствие того, что существующие в настоящее время некогерентные источники света характеризуются недостаточной яркостью и монохроматичностью, максимальные расстояния, доступные для современной интерферометрии (в лабораторных условиях), равны нескольким метрам.

Использование ОКГ позволяет получить отчетливые интерференционные картины на больших расстояниях. В таком интерферометре луч ОКГ используется как несущая модулированного сигнала и интерферометрические измерения производятся на частоте модуляции. Идеальным прибором для этой цели является газовый генератор, поскольку он характеризуется чрезвычайно высокой монохроматичностью и может работать в непрерывном режиме.

В настоящее время радиус действия интерферометров, в которых используются газовые генераторы, превосходит предельное значение, определяемое наличием атмосферных флуктуаций. Максимальная величина радиуса действия таких интерферометров равна:

$$L_{\text{макс}} = \frac{c}{\Delta f},$$

где c — скорость света; Δf — ширина спектральной линии. Для ОКГ на гелий-неоновой смеси $L_{\text{макс}}$ равна

500 *км* (в предположении отсутствия атмосферы и достаточной яркости ОКГ). В нормальных условиях величина $L_{\text{макс}}$ превышает необходимую дальность для большинства практических применений.

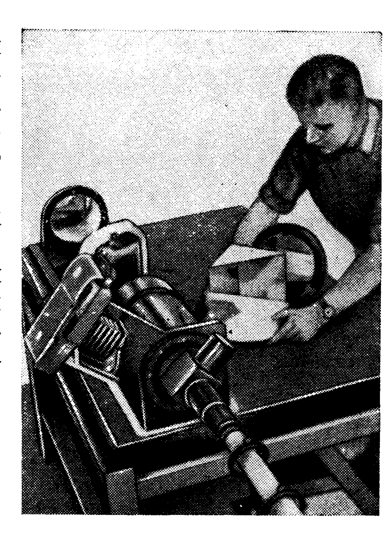


Рис. 35. Интерферометр для проверки качества крупногабаритных оптических деталей.

На рис. 35 изображен интерферометр (в котором используется ОКГ на гелий-неоновой смеси), применяемый для исследования крупногабаритных оптических деталей. При использовании обычных источников света подобные исследования вообще невозможны. Мощность генератора равна 1 *мвт*, рабочая длина волны 6 328 Å.

Генераторы света могут быть использованы также в различных геофизических приборах, например в сейсмографах.

Блок-схема сейсмографа, приведенного на рис. 36, включает два газовых ОКГ (*3* и *4*). Одно из зеркал резонатора каждого генератора (*1* и *6*) соединено с колеблющейся массой *2* (в случае маятникового сейсмографа). При колебаниях маятника длина одного резонатора увеличивается, а другого — уменьшается. Это приводит к соответствующему изменению рабочих частот генераторов. С помощью оптического смесителя *5* производится выделение разностной частоты, изменение величины которой является мерой амплитуды колебаний маятника. Чувст-

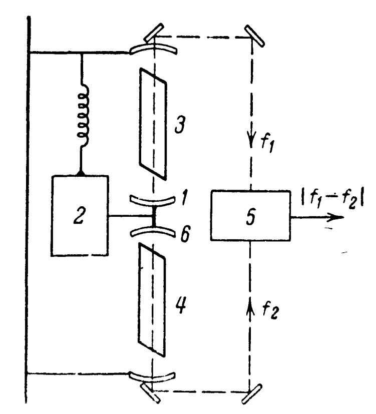


Рис. 36. Схематическое изображение сейсмографа с использованием ОКГ.

вительность такого сейсмографа по крайней мере на порядок выше чувствительности сейсмографов других типов.

Используя газовые ОКГ, удалось повторить эксперимент Майкельсона—Морли, увеличив его точность приблизительно на три порядка. Идея эксперимента заключается в том, что значение рабочей частоты газового гелий-неонового генератора определяется временем распространения света в резонаторе. Изменение скорости света в резонаторе (или изменение длины последнего) может быть обнаружено как изменение рабочей частоты ОКГ. При различных ориентациях генератора относительно Земли значение его рабочей частоты остается неизменным. Таким образом было установлено отсутствие изменений скорости света с точностью до 0,03 *мм/сек.*

Оптический дальномер. В 1965 г. на Лейпцигской юбилейной международной ярмарке был представлен отечественный дальномер, использующий в качестве источника излучения полупроводниковый оптический генератор на арсениде галлия. Особенностью этого генератора является то, что работает он в непрерывном режиме, а мощность излучения составляет 0,5 *мвт*. По принципу измерения дальности этот прибор существенно отличается от зарубежных. Если в зарубежных дальномерах используется импульсный метод дальнометрирования, то в отечественном приборе использован фазовый метод, отличающийся более высокой точностью.

Принцип действия фазового оптического дальномера, упрощенная блок-схема которого представлена на рис. 37, сводится к следующему. Излучение оптического квантового генератора модулируется генератором масштабной частоты (метод модуляции может быть как внутренним, т. е. воздействием на активное вещество, так и внешним, т. е. воздействием на вышедшее из активного вещества излучение), причем напряжение на модуляторе, а следовательно, и выходное излучение промодулированы в соответствии с законом:

$$U_1 = U_{m1} \sin(\omega_м t + \varphi_{01}),$$

где $\omega_м$ — масштабная частота;

φ_{01} — начальная фаза.

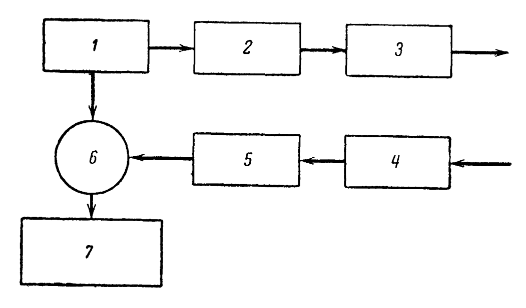


Рис. 37. Блок-схема фазового оптического дальномера.

1 — модулятор; *2* — ОКГ; *3* — передающая оптическая система; *4* — приемная оптическая система; *5* — приемник излучения; *6* — фазометрическое устройство; *7* — регистрирующее устройство.

В результате отражения от цели излучение снова попадает на приемо-передающее устройство оптического дальномера, которое преобразует его в электрический сигнал:

$$U_2 = U_{m2}\sin[\omega_м(t - t_D) + \varphi_{01} - \varphi_д - \varphi_{от}],$$

где $\varphi_{от}$ — угол сдвига фазы масштабного колебания, возникающий при отражении от объекта;

$\varphi_д$ — запаздывание фазы масштабного колебания в цепях оптического дальномера.

Напряжения U_1 и U_2 поступают на вход фазометра, который по разности фаз выдает сигнал, пропорциональный расстоянию до цели:

$$D = -\frac{c}{2\omega_м^2}(\varphi_р - \varphi_д - \varphi_{от}),$$

где

$$\varphi_р = \omega_м t_D + \varphi_д + \varphi_{от}.$$

Рассмотрим, от чего зависит точность работы оптического дальномера. В первую очередь она определяется точностью масштабной частоты:

$$\Delta D = -\frac{c}{2\omega_м^2}(\varphi_р - \varphi_д - \varphi_{от})\,\Delta\omega_м,$$

где $\Delta\omega_м$ — ошибка масштабной частоты.

Тогда

$$\frac{\Delta D}{D} = -\frac{\Delta\omega_м}{\omega_м},$$

что говорит о том, что относительная дальномерная ошибка равна относительной ошибке масштабной частоты.

Во вторую очередь точность работы оптического дальномера определяется точностью измерения разности фаз. Можно записать, что

$$\Delta D = \frac{c}{2\omega_м}(\Delta\varphi_р - \Delta\varphi_д - \Delta\varphi_{от}),$$

где $\Delta\varphi_р$ — ошибка в измерении разности фаз;
$\Delta\varphi_д$ — ошибка запаздывания фазы в цепях дальномера;
$\Delta\varphi_{от}$ — ошибка сдвига фазы при отражении.

Первая составляющая этой ошибки определяется техническими параметрами фазометра. Вторая составляющая зависит от стабильности фазовой характеристики дальномера, третья составляющая зависит от того, насколько точно учтены отражающие свойства цели. При измерении расстояния до подвижной цели вносится еще одна ошибка, источником которой является частота Допплера. Исследования показывают, что вторая и третья составляющие в последнем выражении являются величинами второго порядка малости по сравнению с первой составляющей, поэтому в предварительных расчетах ими можно пренебречь. Из анализируемого выражения можно сделать еще один вывод о том, что дальномерная ошибка уменьшается с ростом масштабной частоты. В принципе желательно масштабную частоту приближать к несущей частоте. С этой точки зрения также можно отметить, что переход к более коротким длинам волн дает выигрыш в повышении точности измерений. Но это имеет и свою отрицательную сторону. Дело в том, что однозначное измерение разности фаз возможно только в пределах 2π, в противном случае возникает многозначность отсчета дальности. Для того чтобы избежать многозначности отсчета, необходимо выполнять условие

$$\varphi_{р.макс} - \varphi_{р.мин} = \frac{2\omega_м}{c}(D_{макс} - D_{мин}) \leqslant 2\pi.$$

При $D_{\text{мин}}=0$ это условие принимает вид:

$$\frac{2\omega_{\text{м}}}{c} D_{\text{макс}} \leqslant 2\pi.$$

Это выражение дает возможность определить максимальное значение масштабной частоты

$$\omega_{\text{м}} \leqslant \frac{c\pi}{D_{\text{макс}}}.$$

Таким образом, мы сталкиваемся с двумя противоречивыми требованиями. Для повышения точности измерений необходимо увеличивать масштабную частоту, а для выполнения условия однозначности измерений ее необходимо уменьшать. Выход из этого обычно таков: используют две, а иногда и три масштабные частоты. Первая служит для грубого определения дальности, вторая — для более точного, а третья — для еще более точного измерения дальности. С тем чтобы обеспечить однозначность в определении дальности, период последующей масштабной частоты должен быть заведомо больше, чем возможные ошибки, возникающие при определении времени запаздывания по грубой шкале. Этим и ограничивается максимальное значение каждой последующей масштабной частоты. Исходя из этого принципа и создан дальномер. Его первая масштабная частота равна 100 *кгц*, а вторая масштабная частота — 10 *Мгц*. Измерение дальности производится последовательно. Сначала выполняется грубое определение дальности, а затем точное. На всем диапазоне в 2000 *м* дальномер обеспечивает точность измерений, равную 20 *см*. Это делает его незаменимым прибором для геодезических измерений. Приемо-передающий блок прибора весит всего 6 *кг*, измерительный блок — 5 *кг*, а блок питания — 15 *кг*. Сухие батареи обеспечивают непрерывную работу прибора в течение 50 *ч*. Советский оптический дальномер ГД-314 показан на рис. 38.

Измерение линейных скоростей можно производить, используя эффект Допплера. При этом относительная скорость какого-либо объекта определяется формулой

$$\Delta f = \frac{2fV}{c},$$

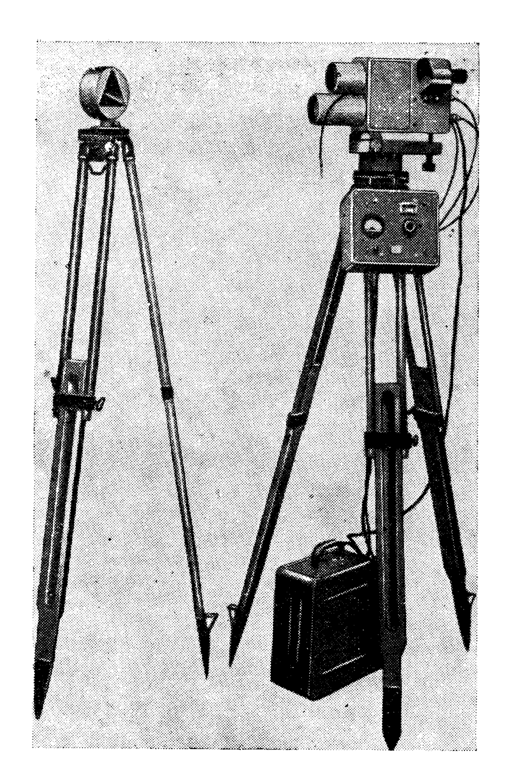


Рис. 38. Оптический дальномер ГД-314.

где V — измеряемая скорость; c — скорость света; f — частота. Поскольку рабочая частота ОКГ, работающих в пределах видимого спектра или в ближней ИК области, равна 10^{14} *гц*, то скорости объекта, равной нескольким сантиметрам в секунду, соответствует допплеровская частота порядка 10 *кгц*. Таким образом, оказывается возможным измерение широкого диапазона скоростей с большой точностью. В этом случае наиболее целесообразно использовать газовые ОКГ вследствие высокой степени когерентности сигнала и возможности работы в непрерывном режиме.

Оптический квантовый гироскоп. В настоящее время ведутся работы по применению оптических генераторов для определения угловых скоростей различных объектов. Разрабатываются оптические приборы, которые, как предполагают, в скором времени заменят ряд гиро-

скопических навигационных приборов. Оптические гироскопы не имеют ничего общего с обычными гироскопами, так как они работают на совершенно иных физических принципах.

На рис. 39 показана схема, по которой был сделан первый лабораторный образец оптического гироскопа. Прибор состоит из четырех газовых оптических генераторов, размещенных по сторонам квадрата. Каждый генератор работает в непрерывном режиме и излучает в обе стороны. В углах квадрата расположены зеркала, установленные под углом 45° к продольной оси газоразрядной трубки. Излучение каждого генератора таким образом направляется в соседний генератор. Таким путем достигается такое положение, что по этой оптически замкнутой системе циркулируют два световых потока один навстречу другому. Резонатор, образованный такой системой зеркал, носит название кольцевого резонатора. В одной из сторон квадрата установлено полупрозрачное зеркало, которым отводится световой поток на чувствительный элемент, в качестве которого используется ФЭУ.

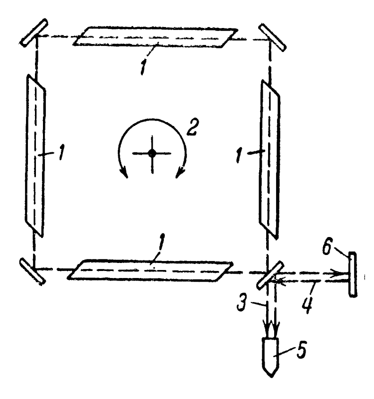


Рис. 39. Схематическое изображение датчика угловой скорости вращения.

1 — газовый ОКГ; *2* — направление вращения; *3* — луч, вращающийся по часовой стрелке; *4* — луч, вращающийся против часовой стрелки; *5* — ФЭУ; *6* — неподвижное зеркало.

Пока система остается неподвижной относительно оси вращения (показанной точкой), оба луча приходят на приемник в одной фазе. При вращении системы один из лучей проходит большее расстояние, чем другой. Это приводит к тому, что на ФЭУ приходят два световых потока, сдвинутых по фазе. В результате на ФЭУ возникают биения. Частота этих биений зависит от угловой скорости вращения и определяется выражением

$$\Delta f = \frac{4\omega S}{p\lambda},$$

где ω — угловая скорость;

S — площадь кольца;

p — периметр кольца;
λ — длина волны.

Зависимость частоты линий от угловой скорости вращения представлена на рис. 40. Хорошо видно, что зависимость носит линейный характер. На этом же графике точками показаны данные, полученные эксперименталь-

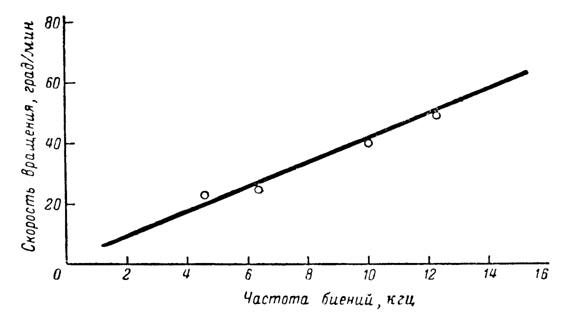


Рис. 40. Зависимость частоты биений от угловой скорости для оптического гироскопа.

но для оптического генератора на гелий-неоновой смеси, работающего на длине волны 1,153 *мк*. Длина стороны квадрата составляла 1 *м*. Мощность, потребляемая всем устройством, не превышала 50 *вт*. При испытаниях прибор вращали с угловыми скоростями от 2 до 600 *град/мин*, что приводило к изменению частоты биений от 500 *гц* до 150 *кгц*.

В последнее время усилия ученых направлены на уменьшение габаритов прибора на упрощение его конструкции. Один из вариантов нового прибора имеет форму равностороннего треугольника. Такой гироскоп значительно проще в настройке и юстировке. Приведенная формула показывает, что чувствительность прибора определяется, помимо габаритов, еще и длиной волны, на которой работает оптический генератор. Чем короче длина волны, тем чувствительнее система. Последние типы гироскопов используют генераторы, работающие на длине волны 0,6328 *мк*. Это позволяет сократить габариты прибора. Одна из последних моделей гироскопа использует ОКГ длиной всего 30 *см*, работающий на длине волны 0,6328 *мк*. Габариты прибора не превышают четверти квадратного метра. Исследования пока-

зали, что такой гироскоп способен измерять угловые скорости до 0,001 *град/ч*.

Разрабатывается гироскоп и на полупроводниковых оптических генераторах, работающих на длине волны 0,71—0,84 *мк*.

Оптические гироскопы являются очень перспективными, поскольку они используют в качестве источника излучения оптический генератор, отличающийся высокой стабильностью частоты. Следовательно, уход таких гироскопов значительно меньше роторных и составляет всего 5 *угл. сек/сутки*. Кроме того, они имеют чувствительность гораздо бо́льшую, чем чувствительность роторных гироскопов. Отсутствие вращающихся деталей делает оптический гироскоп не чувствительным к нелинейным ускорениям. Все это открывает перспективы применению оптических квантовых гироскопов.

Весьма перспективным является использование квантовых генераторов для скоростной киносъемки при исследовании развития быстротечных процессов. Были предприняты попытки создания своебразного кинофильма, снятого со скоростью $1{,}6 \cdot 10^6$ *кадров/сек*. Источником освещения служил рубиновый ОКГ, использовавшийся в режиме модуляции добротности резонатора. Мощность в импульсе при этом равнялась 10^4 *вт*, длительность импульса 10^{-8} *сек*.

Спектроскопия. Благодаря чрезвычайно высокой плотности энергии в луче ОКГ удается исследовать состав практически любого жидкого или твердого вещества независимо от его размеров. Под действием излучения происходит испарение исследуемого образца, однако температура паров (5 000—10 000° К) в ряде случаев оказывается недостаточной для полного анализа. Для устранения этого недостатка после испарения образца под действием излучения ОКГ в образовавшейся плазме производят разряд конденсатора емкостью 10 *мкф*, заряженного до 1 *кв*. Возникающий разряд увеличивает энергию частиц, образующих плазму до 14 *эв*. При этом удается анализировать образцы, вес которых не превышает 1 *мкг*, и обнаруживать присутствие примесей, вес которых равен приблизительно 10^{-11} *г*.

Диагностика плазмы. Существуют несколько методов измерения температуры и плотности плазмы. В некоторых случаях плотность электронов в высокотемператур-

ной плазме определяется с помощью интерферометров. Поскольку длительность процесса образования плазмы не превышает 1 *мксек*, для исследования этого явления необходимы значительно более короткие импульсы, источниками которых может служить рубиновый генератор, работающий в режиме модуляции добротности резонатора. Кроме того, так как излучение рубинового ОКГ в достаточной степени монохроматично, удается исключить влияние собственного излучения плазмы,

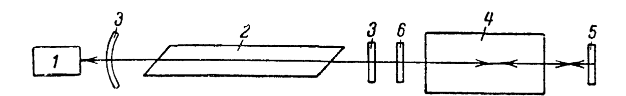


Рис. 41. Установка для диагностики плазмы.
1 — ФЭУ; *2* — газоразрядная трубка; *3* — зеркала; *4* — резонатор, заполненный плазмой; *5* — внешнее зеркало; *6* — фильтр.

используя узкополосные спектральные фильтры. Анализ полученных интерферограмм показывает, что изменение интерференционной картины обусловлено наличием плазмы; сдвиг на одно кольцо соответствует плотности электронов $3 \cdot 10^{17}$ *см*$^{-2}$.

Схематическое изображение экспериментальной установки для реализации другого метода измерения плотности плазмы приведено на рис. 41. Плазма образуется в пассивном резонаторе, связанном с газовым ОКГ, работающим одновременно на волнах 0,63 и 3,39 *мк*. В данном случае используется интерференция световых волн в пассивном резонаторе, заполненном плазмой. При изменении оптической длины системы (что достигается изменением коэффициента преломления) сигнал на выходе будет промодулирован допплеровской частотой, соответствующей скорости изменения оптической длины системы. При этом модуляция сигнала в ИК диапазоне приводит к усилению модуляции сигнала в длинноволновой части оптического диапазона, который регистрируется с помощью ФЭУ.

С помощью ОКГ может определяться распределение температуры электронов. Обычно при этом пользуются следующей методикой: исследуется рассеяние светового сигнала (источником которого является генератор, работающий в режиме модуляции добротности резона-

тора) в дуговом разряде. Поскольку спектральное распределение рассеянного света связано с распределением скоростей электронов (эффект Допплера), то удается непосредственно измерить температуру электронного газа.

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И СВАРКА

Это направление использования оптических квантовых генераторов находит широкое применение в микроэлектронике и промышленности. Дело в том, что микроэлектроника предъявляет повышенные требования к процессу производства. К числу таких требований можно отнести постоянный контроль в процессе получения и обработки микросхем, высокую точность обработки микроэлементов при обеспечении сохранности соседних участков, экономическую эффективность при высокой надежности технологических операций. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют ОКГ, поскольку их излучение может быть сфокусировано простейшим оптическим устройством на требуемом участке микросхемы, причем в месте фокусирования может быть получена высокая плотность энергии, доходящая до 10^{10} *дж/см*^{2}. Эта энергия вырабатывается за время 10^{-3}—10^{-6} *сек*. В процессе работы длительность импульса и величина энергии может варьироваться, что позволяет осуществлять самые различные операции, начиная от термической обработки и кончая «сверлением» отверстий самых различных диаметров.

Кратковременное сосредоточение высокой плотности энергии на малом участке поверхности обеспечивает сохранение окружающих участков, поскольку энергия не успевает тратиться на их нагрев.

Даже в сравнении с широко используемым в микроэлектронике электронно-лучевым способом обработки применение способа обработки оптическим излучением дает ряд преимуществ, поскольку отпадает необходимость вести обработку в вакууме и устраняет вредное воздействие рентгеновского излучения, сопровождающего первый способ.

Кроме того, установки, использующие ОКГ в качестве источника излучения, проще в изготовлении, в работе и значительно дешевле.

Воздействие луча оптического генератора на материалы состоит в том, что энергия фотонов передается свободным электронам, которые отдают ее решетке, что приводит к повышению температуры в облучаемой точке.

В результате резкого повышения местной температуры происходит испарение материала и выбрасывание его в виде паров, что в свою очередь приводит к дополнительному разрушению материала. Дальнейшее повышение плотности облучаемой энергии приводит к тому, что материал выбрасывается не только в виде паров, но и виде жидких капель и даже мелких кусочков материала. Глубина отверстия определяется не столько величиной энергии в одном импульсе, сколько количеством импульсов и частотой их повторения. Несколькими импульсами, следующими один за другим, можно добиться большего эффекта, чем одним импульсом с большой энергией. Так, например, на рис. 42 показано отверстие для образования которого требуется 8 импульсов по 2,2 *дж*, в то время как за один импульс можно получить отверстие с такой глубиной, если величина энергии будет не менее 50 *дж*. Кроме того, для данного профиля отверстия характерно то, что соотношение глубины и диаметра составляет 25 : 1, что сопоставимо с размерами отверстия, получаемого с помощью электронного луча.

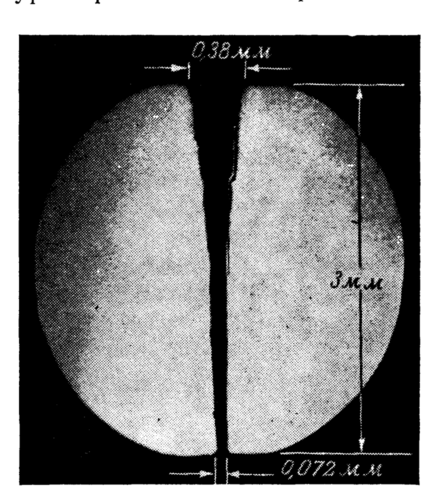


Рис. 42. Сечение отверстия, пробитого ОКГ в металле.

Воздействие излучения ОКГ на прозрачные материалы сопровождается ярким свечением и повреждением их, причем в зависимости от качества материала и подводимой энергии размеры повреждения меняются

от небольших углублений до значительных трещин. Характер разрушения иногда несколько отличается от разрушения металлических материалов. На рис. 43 показано стекло, подверженное облучению с высокой плотностью энергии. Видно, что основное разрушение наблюдается на стороне материала, противоположной облучаемой. На облучаемой же стороне имеется лишь небольшое отверстие.

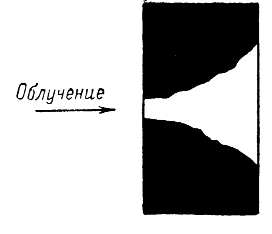


Рис. 43. Сечение отверстия, пробитого ОКГ в стекле.

Таким образом, в зависимости от материала, плотности энергии и длительности импульса можно производить различные технологические операции, начиная от термической обработки и кончая получением отверстий различной глубины и диаметра.

Изготовление прецизионных пленочных резисторов

Процесс изготовления резисторов состоит в том, что вначале на внутреннюю поверхность стеклянной трубки наносят резистивный состав, длина слоя которого и определяет величину сопротивления. Затем на прецизионном токарном станке снимают часть слоя до тех пор, пока не получат требуемую величину сопротивления. После этого резистор подвергают герметизации, искусственному старению и заключают в капсулу. Такой технологический процесс позволяет достигать точности ±0,3%.

В последнее время для повышения точности резисторов стали использовать оптические генераторы, с помощью которых снимают лишнюю часть слоя. Контроль удаления лишнего слоя производится с помощью микроскопа, позволяющего осуществлять исключительно точное наведение луча. Частота следования импульсов и выходная энергия оптического генератора регулируются как вручную, так и автоматически. После окончания обработки резистор покрывают снаружи эпоксидной оболочкой. При использовании оптического генератора для подгонки величины сопротивления была получена точность 0,05%.

Точечная сварка и обработка. С развитием микроэлектроники и печатных схем возникла проблема приваривания выходных концов к тонкопленочным схемам и

полупроводниковым устройствам. Эти операции легко могут быть выполнены при использовании оптических генераторов импульсного типа, для которых характерно то, что благодаря малой длительности импульса зона нагрева материала вокруг места сварки минимальна, а диаметр луча простейшей оптической фокусирующей системой может быть сведен до размеров порядка длины волны, на которой работает генератор. Это позволяет избежать коробления и усадки материала, поскольку окислительные процессы не успевают развиваться. Кроме того, сварка с помощью оптических генераторов применима в различных условиях, так, например, свариваемые поверхности могут быть помещены в вакуум, в камеру высокого давления, в атмосферу любого газа. Сварка в этом случае осуществляется через прозрачные окна камеры.

Отечественная промышленность наладила серийное производство сварочных аппаратов различных типов. Установка типа К-3 использует в качестве источника излучения ОКГ на рубине, излучение которого фокусируется с помощью оптической системы на предметном столике. Длительность импульса может быть либо 0,5, либо 5 *мсек,* но возможность изменять величину энергии позволяет получать выходные мощности, лежащие в пределах от долей ватта до двух киловатт. Совершенная оптическая система позволяет наводить луч на заданную точку с точностью до нескольких микрон, а также фокусировать излучение в пятно диаметром до 3 *мк*. Установка имеет небольшие размеры и предназначена для лабораторных исследований, но может быть применена и на производстве, когда не требуется высокая производительность.

Модифицированная установка К-4 более сложна, но и более совершенна. Ее производительность повышена в 3 раза за счет использования системы охлаждения рубинового стержня. Установка имеет прибор, позволяющий строго контролировать энергию излучения.

Установка С-1, внешний вид которой показан на рис. 44, представляет собой рабочее место оператора, оборудованное комплексом приборов, позволяющих производить термическую обработку и сварку материалов. Оптический квантовый генератор, использующий в качестве активного вещества рубиновый стержень,

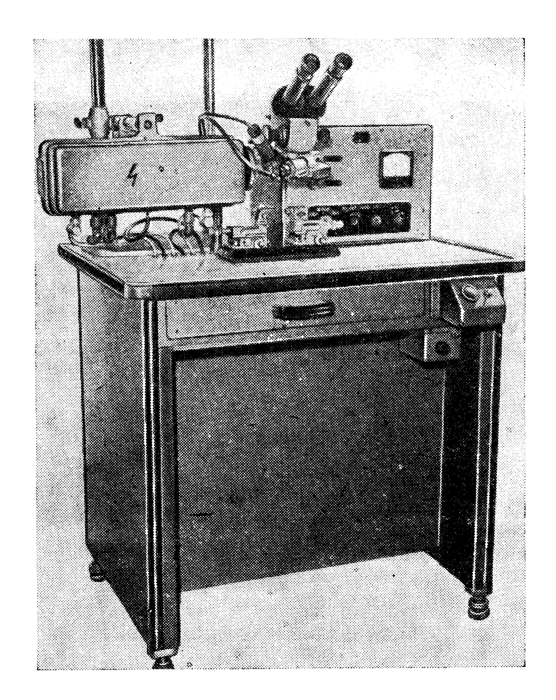


Рис. 44. Внешний вид сварочного аппарата С-1.

смонтирован на рабочем столе. На столе также установлен микроскоп с 84-кратным увеличением и блок измерительных приборов. Пульт управления оптическим генератором размещен справа от оператора. Установка оборудована системой воздушного охлаждения, что позволяет получать частоту до 4 *имп/мин*. Длительность импульсов регулируется в пределах 0,5—5 *мсек*, а энергия регулируется в пределах от десятых долей джоуля до двух джоулей. Для регулирования размеров облучаемой поверхности применяется фокусирующая система со сменной оптикой, позволяющая получать на различных расстояниях сварочное пятно диаметром от 50 до 250 *мк*. Питание установки осуществляется от промышленной сети напряжением 220 *в*, потребляемая мощность составляет 300 *вт*. Установка предназначена для сварки полупроводниковых приборов, микродеталей, пленок. Она позволяет приваривать проволоку толщиной 100 *мк* к материалу любой толщины. На уста-

новке сваривают золото с германием, алюминий с никелем, пробивают отверстия различных диаметров.

Пробивание отверстий. Увеличение плотности энергии до 10^{10} *дж/см²* позволяет использовать оптический генератор для пробивания отверстий в самых тугоплавких материалах. Приводим результаты экспериментального определения глубины отверстия в зависимости от числа импульсов и материала при величине энергии в импульсе 4 *дж*:

Исследуемый материал	Число импульсов	Глубина отверстий, *мм*
Сталь	8	1,58
Никель	120	4,44
Медь	20	0,99

Незначительная глубина пробивания медных пластинок объясняется их высокой теплопроводностью. Вместе с тем отмечено, что для увеличения глубины отверстия необходимо сокращать длительность импульса.

Основным недостатком получения отверстий с помощью ОКГ является то, что края выходного отверстия оплавляются за счет выброшенного материала и отверстие приобретает коническую форму.

Шовная сварка. Несмотря на ряд достоинств, которыми обладают оптические устройства, предназначенные для обработки материалов, они обладают существенным недостатком, присущим всем ОКГ—крайне низким к. п. д. и малой частотой повторения импульсов. Малая частота повторения импульсов приводит к затруднению получения шовной сварки. Конечно, швы можно получать и в виде перекрывающих друг друга точечных соединений, но этот способ совершенно не пригоден на производстве с поточным методом работ с высокой производительностью. В связи с этим усилия ученых и инженеров направлены на обоснование требований к оптическим генераторам, которые могли бы удовлетворять требованиям поточного производства. По предварительной оценке для получения шовных соединений фольговых материалов требуется оптический генератор, работающий в непрерывном режиме (или в режиме незатухающих колебаний) со средней выходной мощностью в 300—500 *вт*, а для получения швов в металлических пластинах — до 10 *квт*. Только в этом

случае оптические сварочные установки смогут заменить электроннолучевые установки, используемые в настоящее время.

Кроме того, вместе с усовершенствованием самих источников излучения требуется проведение серьезных исследований в области изучения физических свойств материалов, подвергающихся такому виду обработки. Только решение всех этих вопросов позволит сделать оптический квантовый генератор действенным производственным инструментом.

ПРИМЕНЕНИЕ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

В ряде стран открываются специальные медицинские лаборатории, в задачу которых входят всесторонние исследования биологического воздействия ОКГ.

Имеются сообщения, что проведенные исследования по воздействию излучений ОКГ на злокачественные опухоли и при лейкемии дают обнадеживающие результаты.

Промышленность СССР и США выпустила офтальмокоагулятор — прибор для исследования и лечения глаз (рис. 45). В нем использован рубиновый ОКГ. Этот прибор позволяет быстро и с большой точностью производить такие операции глаза, как устранение катаракты, образование нового зрачка и т. п. Новый прибор найдет, несомненно, широкое применение, поскольку он обладает рядом ценнейших качеств. Достаточно сказать, что с его помощью можно делать операции без применения наркоза, поскольку операция столь кратковременна, что па-

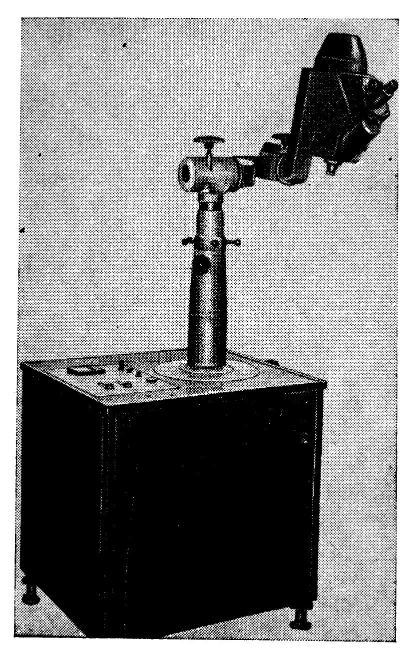


Рис. 45. Внешний вид офтальмокоагулятора.

циент не чувствует боли. Так, наложение шва на ретину осуществляется за 10 *мсек*. Область воздействия луча ОКГ на глаз может быть доведена до кружка диаметром 0,25 *мм*, что уже говорит о той высокой степени точности операции, которую может обеспечить новый прибор.

В Англии ведутся исследования по применению лучей когерентного света в нейрохирургии. Сама излучающая головка слишком тяжела для непосредственного оперирования ею, однако, используя волоконную оптику, можно создать небольшую легкую хирургическую головку с фокусирующей системой.

Считают, что луч генератора можно будет использовать как прецизионный скальпель для различных хирургических операций. Кроме того, излучение ОКГ можно будет использовать для дезинфекции небольших участков, зараженных бактериями.

Зарубежная печать отмечает и другие возможные области использования генераторов в медицинских целях. Так, например, соединив ОКГ с пучком стеклянных волокон, можно выполнить фотографию недоступных для исследования областей тела. Можно использовать ОКГ в качестве мощного источника освещения сравнительно непрозрачных структур тела для их фотографирования и изучения. Можно также использовать излучение ОКГ для моделирования последствий взрывов, чтобы исследовать их в лабораторных условиях.

В октябре 1963 г. были проведены эксперименты по использованию ОКГ для поражения раковых тканей. Подобные работы проводятся в Пасадене (США), где излучение ОКГ применяется для разрушения пораженных клеток. Считают, что это излучение может быть использовано даже для уничтожения меланомы — сильно пигментированного рака. Воздействию подвергались ткани, пораженные 14 видами различных злокачественных опухолей. Опухоли подвергались воздействию излучения ОКГ с интенсивностью от 17 до 12 000 *дж/см*^{2}. Такая плотность излучения достигалась путем сужения при помощи двояковыпуклых линз длинноимпульсного луча рубинового ОКГ с выходной мощностью от 0,5 до 360 *дж*. Исследования показали, что наибольшее влияние лучи ОКГ оказывают на ткани злокачественных опухолей, а воздействие их на здоровые ткани мини-

мально. Не было замечено каких-либо изменений в работе сердечно-сосудистых систем, внутренних органов, изменений кожи и т. п. Однако делать окончательные выводы пока еще преждевременно.

В этих онкологических исследованиях использовались три вида ОКГ с одним, двумя и тремя резонаторами. Переключение добротности не применялось, поскольку первая фаза исследований была направлена на использование длинных импульсов.

Оптический генератор, генерирующий энергию 360 *дж*, имел максимальное расхождение луча 1°, которое уменьшалось до 0,6° при энергии излучения 100 *дж*. Четырехрезонаторный ОКГ имел четыре лампы-вспышки по 10 000 *дж* каждая, которые позволяли поднимать мощность накачки до 32 500 *дж*. Волоконная оптика на данной стадии исследований в лазерной установке не использовалась.

ПРИМЕНЕНИЕ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Одна из потенциальных возможностей использования ОКГ создание сверхбыстродействующих оптических вычислительных машин (ОВМ). Эти машины будут не только более быстродействующими, чем электронные, но и более простыми и, следовательно, более надежными. Известно, что вопросам разработки сверхскоростных, обладающих огромной емкостью вычислительных устройств очень малого объема, пригодных для военного и промышленного использования, уделяется большое внимание. Среди прочих методов рассматривается возможность использования для этой цели оптической квантовой техники, которая может обеспечить удельную емкость хранимой информации до 10^{14} двоичных знаков в одном кубическом сантиметре.

Предполагалось, что на первых порах ОКГ будут использовать скорее как элементы «памяти», чем логические, но уже сейчас создаются и логические оптические схемы. Наиболее вероятно, что первые ОВМ будут устройствами смешанного типа, в которых оптические элементы будут применяться наряду с электронными.

Основные технические преимущества ОВМ, кроме быстродействия, сводятся к следующему.

Световые частоты порядка 10^{14} *гц* и более могут обеспечить более широкую полосу и более высокую

скорость передачи информации при использовании соответствующих видов модуляции.

Оптические системы позволяют осуществить параллельную передачу информации (как это происходит, например, при использовании линз и жгутов оптических волокон). В разработанных к настоящему времени сравнительно медленно действующих (миллисекундных) оптических и оптикоэлектронных системах возможно разветвление одного канала на 1000 параллельных.

Для промежуточных соединений на оптических частотах может быть использовано стекловолокно. На квадрате со стороной 10 *мк* может быть расположено до 100 волокон диаметром 1 *мк*, что даст значительное сокращение размеров вычислительных устройств. Кроме того, оптические волокна не требуют заземляющих цепей.

Существуют три вида вычислительных схем, в которых может быть использована оптика. Первым типом являются оптикоэлектронные схемы, излучающие свет диоды, фотодетекторы и т. д., в которых носителем информации служат и фотоны, и электроны. Далее, имеются чисто оптические системы (ОКГ), в которых фотоны управляют фотонами. И, наконец, к третьему типу схем могут быть отнесены схемы, объединяющие в себе чисто оптические и оптикоэлектронные элементы. Частотный спектр оптических элементов лежит в видимой (4 000—7 000 Å) и близкий инфракрасной (7 500—20 000 Å) областях, где работает большинство разработанных в настоящее время оптических элементов и устройств.

Оптические элементы. Основным оптическим элементом является активное или пассивное стекловолокно. Как уже говорилось, отдельные волокна могут иметь диаметр до 0,1 *мк*, причем каждое из них имеет очень малые потери (затухание в пассивном волокне составляет около 1,1 *дб/м*). Стеклянные нити с присадками различных редких элементов приобретают способность усиливать проходящий сигнал. Благодаря этому свойству они получили название активных световодов. В них могут быть скомпенсированы любые потери проходящих сигналов.

Оптикоэлектронные элементы. Характерным примером

такого элемента может служит полупроводниковый ОКГ, в котором переход возбуждается электрически таким образом, что на выходе появляется световой сигнал. Такой элемент обеспечивает хорошую развязку электрического входа и оптического выхода, чем исключается основной источник обратных связей, характерный для электронных схем. Однако методы изготовления таких диодов с заранее заданными характеристиками пока еще не разработаны. На комбинации диодов, излучающих свет, и фотодиодов может быть создана оптико-электронная релейная схема.

Рассмотрим некоторые оптические счетно-решающие схемы. ОКГ может быть использован в качестве пороговой спусковой схемы. Для этого генератор возбуждается до уровня, близкого к порогу генерации, после чего на его вход подается сигнал, возбуждающий ОКГ до уровня, превосходящего порог генерации. В чисто оптических системах такой входной сигнал имеет форму дополнительного сигнала накачки.

Действие логического элемента типа НЕ—ИЛИ на ОКГ (входной сигнал срывает генерацию, что приводит к отсутствию сигнала на выходе) было уже продемонстрировано.

Кроме того, было разработано считывающее устройство на гелий-неоновом ОКГ непрерывного излучения мощностью 10 *мвт* ($\lambda = 6\,328$ Å). В устройстве используется магнитооптический эффект Керра. Луч генератора с помощью линз фокусируется на магнитный диск диаметром 20 *см.* Благодаря высокой когерентности и большой плотности энергии размер пятна сфокусированного луча зависит только от разрешающей способности оптической системы. В опытной установке было получено пятно диаметром 5 *мк.* Для считывания использовался фотоумножитель, обладающий низким уровнем шума, высокой чувствительностью и эффективностью фотокатода на длине волны излучения ОКГ. Поскольку отношение сигнал/шум при считывании определяется как квадратный корень из плотности энергии, то применение ОКГ непрерывного действия повысило это отношение в 30 раз по сравнению с обычным источником света. Считывание осуществлялось на частоте 250 *кгц.*

Так как предельная плотность записи информации определяется размером светового пятна, с помощью которого производится считывание, то возможно осуществить считывание информации с максимальной плотностью записи не менее 40 000 *дв. ед./см*^{2}. В настоящее время можно уже осуществить считывание со скоростью порядка 500 *кгц* и запись с плотностью 150 *дв. ед./см*^{2}. Реально удалось осуществить считывание информации, записанной с плотностью 80 *дв. ед./см*^{2}.

Число возможных параллельных операций в ОВМ может быть до —10^6. Число возможных переключений в секунду до —10^7, что дает общее число операций до 10^{13} в секунду.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И УВЕЛИЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Одно из новых направлений применения оптических генераторов было продемонстрировано в США летом 1964 г. Пока это был только лабораторный эксперимент, но несомненно, что развитие предложенной идеи и метода получения трехмерного изображения с помощью

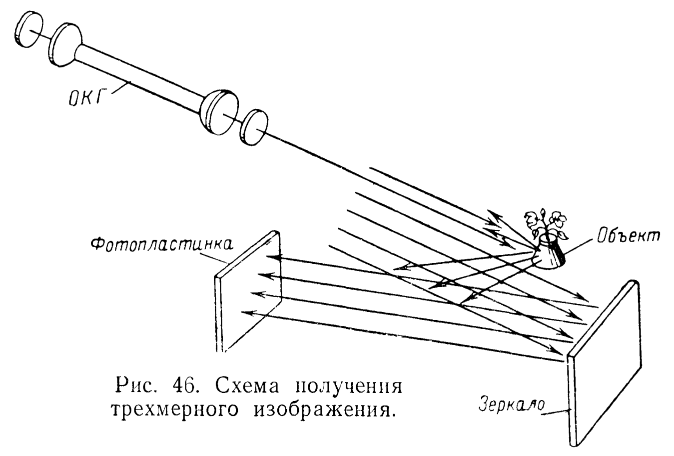


Рис. 46. Схема получения трехмерного изображения.

ОКГ и фотографической пластинки может привести к появлению объемного кино и объемного телевидения, отличающегося простотой устройства.

Метод получения трехмерного изображения состоит в следующем. Трехмерный объект освещается с по-

мощью непрерывно излучающего газового ОКГ. Отраженное излучение попадает на фотопластинку. Вследствие того, что излучение ОКГ является когерентным, на фотопластинке образуется интерференционная картина, которая и регистрируется. Эта картина не имеет ничего общего с действительным изображением объекта, более того, при рассмотрении ее в обычном дневном свете она вообще ни на что ни похожа. Если теперь эту картину осветить когерентным светом оптического генератора, что достигалось в данной схеме эксперимента (рис. 46) путем отражения излучения ОКГ с помощью зеркала, то интерференционная картина преобразуется в изображение объекта. Это изображение является трехмерным, и для получения его не требуется никаких дополнительных смотровых оптических устройств вроде знакомых нам очков с цветными стеклами или стереоскопа.

Специальная фотопластинка называется «голограммой», в соответствии с чем и новый метод регистрации объектов назван голографией. Этот метод позволяет получать большие увеличения изображений без линз и других оптических устройств двумя способами. Первый состоит в том, что голограмма получается с помощью коротковолнового света, а воспроизводится с помощью более длинноволнового света, в результате чего видимое изображение увеличивается в число раз, равное отношению этих двух длин волн. Второй способ увеличения изображения основан на использовании расходящегося пучка света. Если световой луч оптического квантового генератора имеет больший угол расхождения, чем луч экспонирующего генератора, то размеры изображения увеличиваются.

К недостаткам голографии относятся высокая потребная мощность оптического генератора, а также высокая стабильность положения объекта во время экспозиции. Однако уже и сейчас этот метод может найти широкое применение в исследовании структуры сложных молекул, поскольку он позволяет получать объемные изображения более высокого качества, чем при использовании других методов.

ОПАСНОСТЬ ОБЛУЧЕНИЯ КВАНТОВЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Можно сказать, что сейчас мы знаем о воздействии излучения ОКГ на человека столько же, сколько о рент-

геновских лучах на самом первом этапе их открытия, столько же, сколько о радиоактивном излучении урановых элементов на заре их исследования. В те времена техник для проверки работы установки обычно подносил руку к ее экрану, а Мария Кюри голыми руками брала радиоактивные вещества. Опасность была обнаружена только тогда, когда на руках появились явные признаки заболевания.

При работе с ОКГ наибольшей опасности подвергаются глаза исследователей, некоторые ученые высказывают также мысль о возможности возникновения рака при длительном облучении.

Результаты проведенных в США экспериментов по исследованию биологического воздействия излучения ОКГ показали следующее. Облучение глаз белых мышей лучами с энергией порядка 100 *дж* приводило к серьезным повреждениям. У черных мышей разрушалась глазная впадина. Облучение лба мышей такой же энергией приводило к смертельному исходу 75% облученных. Облучение кожи человека приводило к разрушению тканей. Анализ несчастных случаев, имевших место с экспериментаторами, подвергшимися случайному облучению, показывает, что даже непрямое облучение глаз приводит к утрате способности аккомодации на близлежащие предметы, что связано с повреждением мышц хрусталика. Облучению были подвергнуты клетки и ткани, выращенные между стеклянными пластинками, т. е. не защищенные покровным слоем кожи. Оказалось, что пигментированные клетки повреждаются, в то время как непигментированные клетки переносят облучение нормально. Это явление может быть использовано при лечении некоторых видов рака с высокой степенью пигментации. Одновременно облучение группы клеток концентрированным излучением приводит к их коагуляции. В потоке крови коагуляция приводит к образованию тромба.

Таким образом, пока нет исчерпывающей информации о вредном воздействии излучения ОКГ, необходимо избегать не только прямого облучения, но и отраженного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание квантовых генераторов и усилителей оптических излучений является одним из наиболее значительных достижений современной науки. На стыке квантовой механики, физической оптики и радиоэлектроники родилось новое направление, называемое квантовой оптикоэлектроникой, которое охватывает теорию и методы создания, а также способы применения квантовых приборов оптического диапазона. Новое направление, основы которого заложены советскими учеными, открыло широкие перспективы в оптической локации, связи и телевидении, в приборостроении, промышленности и медицине.

Кроме указанных областей применения, оптические генераторы используются для получения плотной высокотемпературной плазмы, температура которой достигает 500 тысяч градусов, а также для ускорения химических реакций и получения таких реакций, которые раньше считались невозможными. Однако и этим еще не будут исчерпаны возможные области применения оптических квантовых генераторов. Каждый день может принести сообщение о новых качественных скачках, полученных в тех или иных областях науки и техники при использовании когерентного излучения. Возможно, именно оптические генераторы ускорят создание объемного кино и объемного телевидения с высококачественным стереофоническим звучанием. Может быть именно оптические генераторы будут способствовать появлению новых дешевых синтетических материалов с необычными свойствами. Возможно, только оптические генераторы позволят осуществлять связь с космическим аппаратом, входящим в плотные слои атмосферы, когда из-за наличия слоя ионизированного воздуха радиосвязь прекращается в самый ответственный момент. Всего сейчас предугадать трудно, да и очень много еще предстоит сделать. Но можно с уверенностью сказать, что советские ученые приложат все усилия, чтобы достижения квантовой оптикоэлектроники поставить на службу строительства коммунизма.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 18 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»